

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

COMPORTAMIENTO DEL CARBONATO DE SODIO Y CARBONATO DE POTASIO A
DIFERENTES HUMEDADES Y TEMPERATURAS AMBIENTALES

TESIS DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: ANDREA ANABELLA BRAVO SÁNCHEZ

QUITO

2013

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

COMPORTAMIENTO DEL CARBONATO DE SODIO Y CARBONATO DE POTASIO A
DIFERENTES HUMEDADES Y TEMPERATURAS AMBIENTALES

TESIS DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA

AUTORA: ANDREA ANABELLA BRAVO SÁNCHEZ

TUTOR: ING. CÉSAR A. ALVARADO C.

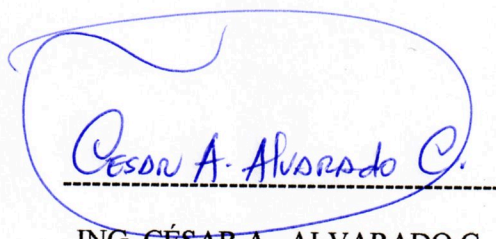
QUITO

2013

APROBACIÓN DEL TUTOR

Certifico que la tesis de grado titulada “COMPORTAMIENTO DEL CARBONATO DE SODIO Y CARBONATO DE POTASIO A DIFERENTES HUMEDADES Y TEMPERATURAS AMBIENTALES”, es original y ha sido desarrollado por la señorita Andrea Anabella Bravo Sánchez, bajo mi dirección y conforme a todas las observaciones realizadas.

En la ciudad de Quito a los 17 días del mes Diciembre de 2012.



ING. CÉSAR A. ALVARADO C.


TUTOR

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL

Yo, ANDREA ANABELLA BRAVO SÁNCHEZ en calidad de autora de la tesis de grado realizada sobre COMPORTAMIENTO DEL CARBONATO DE SODIO Y CARBONATO DE POTASIO A DIFERENTES HUMEDADES Y TEMPERATURAS AMBIENTALES, por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o de parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la Ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

En la ciudad de Quito, a los 18 días del mes de Enero del 2013



Andrea Anabella Bravo S.

C.C. 172110767-8

andreabravosanchez@hotmail.com

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido culminar mi profesión junto a mis seres queridos.

A mis padres, Anabella y Jhon, quienes con su amor y confianza, permanentemente me apoyaron, contribuyendo incondicionalmente al logro de esta meta.

A mi hermano John, por estar siempre presente con su apoyo y ayuda.

A mis abuelos, quienes desde el cielo y la tierra, son mi guía y luz.

A mis tías Flor Inés y Natacha, por su amor y ayuda desinteresada en todo momento de mi vida.

Andrea

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme fortaleza y guiar mi vida cada día.

A la Universidad Central del Ecuador, principalmente a la Facultad de Ingeniería Química donde orgullosamente tuve la oportunidad de formarme como persona y profesional.

Al Consejo Nacional de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas, en especial al Ing. Jofre Jiménez, por su valioso aporte durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Cesar Alvarado por su sabios consejos, asesoría y dirección en presente trabajo de grado.

A mis maestros, por compartir sus conocimientos y sabiduría en mi vida estudiantil.

A mi madre, por ser mi mejor amiga, por su amor y comprensión, y su ayuda incondicional para seguir adelante.

A mi padre, que con amor y esfuerzo, me apoyó con sus consejos y los recursos para estudiar esta hermosa profesión.

A mi hermano por su confianza y colaboración en todo momento de mi vida.

A Rosita, por su amor inmenso y ayudarme siempre en todo lo que necesité.

A toda mi familia y amigos por su apoyo, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida.

CONTENIDO

	pág.
CONTENIDO	xi
LISTA DE TABLAS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE GRAFICOS	xviii
LISTA DE ANEXOS	xx
GLOSARIO	xxii
RESUMEN	xxv
ABSTRACT	xxvi
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	3
1.1 Consejo Nacional de Control de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas	3
1.1.1 Misión	3
1.1.2 Visión	3
1.1.3 Sustancias químicas sujetas a fiscalización	4
1.2 Carbonato de Sodio	4
1.2.1 Generalidades	4
1.2.2 Formas del Carbonato de Sodio	5
1.2.3 Propiedades del Carbonato de Sodio	6
1.2.4 Obtención industrial	7
1.2.5 Usos ilícitos	9
1.2.6 Usos del Carbonato de sodio en la actividad industrial ecuatoriana	9

1.2.7 Presentaciones de Carbonato de sodio	10
1.3 Carbonato de Potasio	11
1.3.1 Generalidades	11
1.3.2 Propiedades del Carbonato de Potasio	12
1.3.3 Obtención industrial	12
1.3.4 Usos ilícitos	13
1.3.5 Usos del Carbonato de Potasio en la actividad industrial ecuatoriana	13
1.3.6. Presentaciones de Carbonato de Potasio	15
1.4 Humedad Relativa del Aire	15
1.5 Sólidos Solubles	16
1.6 Sólidos Insolubles	16
1.6.1 Sólido Húmedo	16
1.6.2 Sólido Higroscópico	16
1.7 Humedad del Sólido	16
1.7.1 Contenido de humedad, en base húmeda	16
1.7.2 Contenido de humedad, en base seca	17
1.7.3 Humedad de equilibrio X^*	17
1.7.4 Humedad Libre	17
1.7.5 Humedad no ligada	17
1.7.6 Humedad ligada	17
1.8 Definición de Actividad de Agua	18
1.9 Determinación de la Humedad de Equilibrio	19
1.9.1 Método Gravimétrico	19
1.10 Isotermas de Sorción de Humedad	20
1.10.1 Generalidades	20
1.10.2 Adsorción	20
1.10.2.1 Adsorción física	20
1.10.2.2 Adsorción química	21
1.10.3 Isotermas de sorción	21
1.10.4 Desorción	21
1.10.5 Absorción	22
1.10.6 Regiones de la isoterma de sorción	22
1.10.6.1 Primera región	22

1.10.6.2 Segunda región	23
1.10.6.3 Tercera región	23
1.10.7 Tipos de isothermas de sorción de humedad	23
1.10.7.1 Isotherma Tipo I o tipo Langmuir	23
1.10.7.2 Isotherma Tipo II	23
1.10.7.3 Isotherma III o de Flory Huggins	23
1.10.7.4 Isotherma Tipo IV	23
1.10.7.5 Isotherma Tipo V	24
1.10.7.6 Isotherma Tipo VI	24
1.11 Modelos Matemáticos para Interpretar las Isothermas de Sorción	24
1.11.1 Modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET)	25
1.11.2 Modelo de Anderson, de Boer y Guggenheim (GAB)	26
1.11.3 Modelo de PELEG	26
1.11.4 Modelo de D'Arcy and Watt	27
1.12 Influencia de CO ₂ en la Formación de Bicarbonatos	27
1.12.1 Ley de Henry	27
1.12.2 Alcalinidad.	28
1.12.2.1. Relaciones de alcalinidad	31
1.12.3 Dióxido de carbono, CO ₂	31
 2. PARTE EXPERIMENTAL	 33
2.1 Proceso experimental seleccionado	33
2.1.1 Descripción del proceso experimental	33
2.1.1.1 Obtención de muestras para la experimentación	33
2.1.1.2 Determinación de humedad inicial de las muestras	33
2.1.1.3 Acondicionamiento de las muestras	34
2.1.1.4 Preparación de las soluciones saturadas para la generación de humedad relativa conocida	34
2.1.1.5 Recipientes herméticos	34
2.1.1.6 Medición de la actividad de agua de las soluciones saturadas	34
2.1.1.7 Tiempo de equilibrio	34
2.1.1.8 Medición de la humedad de Equilibrio de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio	35
2.1.1.9 Construcción de las isothermas de sorción	35
2.2 Diseño experimental	37

2.3 Materiales y Equipos	39
2.4 Sustancias y Reactivos	39
2.5 Desarrollo de pruebas experimentales	40
2.5.1 <i>Determinación de las Isotermas de Sorción de Humedad</i>	40
2.5.2 <i>Obtención de muestras para la experimentación</i>	40
2.5.3 <i>Medición humedad inicial de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio</i>	41
2.5.4 <i>Preparación de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio</i>	42
2.5.5 <i>Descripción del equipo</i>	44
2.5.5.1 <i>Preparación de recipientes herméticos</i>	44
2.5.5.2 <i>Tratamiento de los viales</i>	44
2.5.6 <i>Preparación de las soluciones saturadas para la generación de humedad relativa conocida</i>	44
2.5.6.1 <i>Medición de la actividad de agua de las soluciones saturadas</i>	45
2.5.7 <i>Tiempo de equilibrio</i>	46
2.5.8 <i>Determinación de la humedad relativa de equilibrio</i>	46
2.6 Datos Experimentales	48
2.6.1 <i>Simbología y Codificación de Variables</i>	48
2.6.2 <i>Datos de la determinación del contenido de humedad inicial del carbonato de sodio y carbonato de potasio por método gravimétrico</i>	49
2.6.3 <i>Datos de la determinación del contenido de humedad inicial del carbonato de sodio y carbonato de potasio por medio de un analizador</i>	49
2.6.4 <i>Secado de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio</i>	50
2.6.5 <i>Actividad de agua de las soluciones salinas saturadas preparadas</i>	50
2.6.6 <i>Datos experimentales para el cálculo de la humedad de equilibrio</i>	50
2.6.7 <i>Datos para análisis de formación de bicarbonatos en carbonatos por acción del dióxido carbono del aire</i>	57
 3. CALCULOS Y RESULTADOS	 58
3.1 Isotermas de sorción de humedad	58
3.1.1 <i>Contenido de humedad inicial de muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio</i>	58
3.1.2 <i>Cálculo del contenido de humedad final de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio</i>	58
3.1.3 <i>Cálculo de la humedad de equilibrio del carbonato de sodio y carbonato de potasio</i>	58

3.1.4 Construcción de las isothermas de sorción de humedad para el carbonato de sodio y carbonato de potasio	62
3.1.5 Modelación matemática de las isothermas de sorción de humedad	67
3.1.6 Ajuste de los datos experimentales con los modelos matemáticos de BET, GAB, PELEG y GDW	74
3.1.7 Ajuste gráfico de los datos experimentales con los modelos matemáticos de BET, GAB, PELEG y GDW	76
3.1.8 Regiones de las isothermas de sorción de humedad	80
3.2 Análisis de formación de hidratos de carbonato de potasio y carbonato de sodio	82
3.3 Análisis de formación de bicarbonatos en carbonatos por acción del dióxido carbono del aire	86
3.3.1 Cálculo de la solubilidad del CO_2 en agua adsorbida por las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio	86
3.3.2 Cálculo de la composición de bicarbonato de sodio y bicarbonato de potasio en las muestras húmedas de cada determinación experimental	89
3.3.3 Cálculo de la fracción másica de bicarbonato de sodio y bicarbonato de potasio en las muestras húmedas de cada determinación experimental	90
3.3.4 Cálculo de la composición de carbonato de sodio y carbonato de potasio en las muestras húmedas de cada determinación experimental	92
3.3.5 Cálculo de la fracción másica de carbonato de sodio y carbonato de potasio en las muestras húmedas de cada determinación experimental	94
3.3.6 Determinación experimental del contenido de carbonatos y bicarbonatos en muestras seleccionadas	95
3.3.6.1 Cálculo del contenido de carbonatos y bicarbonatos en muestras analizadas por el DPEC	97
3.4 Aplicación de resultados	101
4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	110
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
5.1 Conclusiones generales	113
5.2 Conclusiones experimentales	114
5.3 Recomendaciones generales	115
5.4 Recomendaciones al CONSEP y a la Industria	116

CITAS BIBLIOGRÁFICAS	117
BIBLIOGRAFIA	125
ANEXOS	127

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Sustancias químicas sujetas a fiscalización	4
Tabla 2. Propiedades Físicas del carbonato de sodio anhidro	6
Tabla 3. Propiedades Físicas de hidratos de carbonato de sodio	6
Tabla 4. Datos de solubilidad del Carbonato de sodio anhidro	7
Tabla 5. Requisitos del Carbonato de sodio de uso industrial	7
Tabla 6. Propiedades físicas Carbonato de Potasio anhidro	12
Tabla 7. Datos de solubilidad del Carbonato de Potasio	12
Tabla 8. Relaciones de alcalinidad	33
Tabla 9. Propiedades del CO ₂	34
Tabla 10. Especificaciones de las soluciones salinas saturadas para las isoterms de sorción de humedad a 25°C	45
Tabla 11. Simbología y Codificación de Variables	48
Tabla 12. Datos para la determinación de humedad inicial en el carbonato de sodio	49
Tabla 13. Datos para la determinación de humedad inicial en el carbonato de potasio	49
Tabla 14. Datos para la determinación de humedad inicial del carbonato de sodio por balanza de calentamiento infrarrojo	49
Tabla 15. Datos para la determinación de humedad inicial del carbonato de potasio por balanza de calentamiento infrarrojo	49
Tabla 16. Secado de la muestra de carbonato de sodio y carbonato de potasio a 105°C	50
Tabla 17. Actividad de agua de soluciones salinas saturadas preparadas a 25°C	50
Tabla 18. Datos experimentales registrados para el carbonato de sodio a 15°C	51
Tabla 19. Datos experimentales registrados para el carbonato de sodio a 25°C	52
Tabla 20. Datos experimentales registrados para el carbonato de sodio a 35°C	53
Tabla 21. Datos experimentales registrados para el carbonato de potasio a 15°C	54

Tabla 22. Datos experimentales registrados para el carbonato de potasio a 25°C	55
Tabla 23. Datos experimentales registrados para el carbonato de potasio a 35°C	56
Tabla 24. Constantes de Henry (K) para CO ₂	57
Tabla 25. Propiedades del agua líquida a diferentes temperaturas	57
Tabla 26. Propiedades del aire	57
Tabla 27. Resultados obtenidos para el cálculo de la humedad inicial en las muestras de carbonato de sodio	59
Tabla 28. Resultados obtenidos para el cálculo de la humedad inicial en las muestras de carbonato de potasio	59
Tabla 29. Humedad de equilibrio carbonato de sodio y carbonato de potasio a siete actividades de agua y temperaturas de 15, 25 y 30°C	62
Tabla 30. Humedad de equilibrio experimental carbonato de sodio	68
Tabla 31. Parámetros de ajuste del modelo de BET para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C	70
Tabla 32. Parámetros de ajuste del modelo de GAB para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C	70
Tabla 33. Parámetros de ajuste del modelo de PELEG para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C	70
Tabla 34. Parámetros de ajuste del modelo de D'Arcy and Watt para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C	71
Tabla 35. Parámetros de ajuste del modelo de BET para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C	71
Tabla 36. Parámetros de ajuste del modelo de GAB para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C	71
Tabla 37. Parámetros de ajuste del modelo de PELEG para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C	72
Tabla 38. Parámetros de ajuste del modelo de D'Arcy and Watt para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C	72
Tabla 39. Cálculo humedades de equilibrio por modelos matemáticos para el carbonato de sodio a 15°C	74
Tabla 40. Resultados Modelo de PELEG ajustado para la predicción de la humedad de equilibrio del carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C	75
Tabla 41. Resultados Modelo de PELEG ajustado para la predicción de la humedad de equilibrio del carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C	75

Tabla 42. Resultados Humedades de equilibrio calculadas con el modelo de PELEG para el carbonato de sodio y carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C	76
Tabla 43. Actividad de agua a nivel de monocapa, obtenida con la ecuación de PELEG a 15, 25 y 35°C	80
Tabla 44. Actividad de agua a límite superior de la región de multicapas en isotermas de sorción	81
Tabla 45. Análisis de formación de hidratos de carbonato de sodio	84
Tabla 46. Análisis de formación de hidratos de carbonato de potasio	85
Tabla 47. Datos para cálculo de la solubilidad del dióxido carbono del aire	87
Tabla 48. Características de la muestra	87
Tabla 49. Solubilidad de CO ₂ en moles de agua presente en muestras de carbonato de sodio a diferentes actividades de agua y temperaturas	88
Tabla 50. Solubilidad de CO ₂ en moles de agua sorbida en muestras de carbonato de potasio a diferentes actividades de agua y temperaturas	89
Tabla 51. Características de la muestra	90
Tabla 52. Bicarbonato de sodio formado	91
Tabla 53. Bicarbonato de potasio formado	91
Tabla 54. Moles de carbonato de sodio remanentes	93
Tabla 55. Moles de carbonato de potasio remanentes	93
Tabla 56. Fracción másica de carbonato de sodio remanente	94
Tabla 57. Fracción másica de carbonato de potasio remanente	95
Tabla 58. Muestras Analizadas DPEC	96
Tabla 59. Datos experimentales del análisis de muestras DPEC	96
Tabla 60. Resultados del análisis de muestras DPEC	98
Tabla 61. Resultados formación bicarbonato de sodio	98
Tabla 62. Resultados formación bicarbonato de potasio	98
Tabla 63. Composición en carbonato de sodio de la muestra	63
Tabla 64. Composición en carbonato de potasio de la muestra	64
Tabla 65. Modelos matemáticos para la predicción de la humedad de equilibrio del carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C	102
Tabla 66. Modelos matemáticos para la predicción de la humedad de equilibrio del carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C	103
Tabla 67. Resultados de humedad de equilibrio carbonato de sodio y carbonato de potasio	103
Tabla 68. Humedad de equilibrio del carbonato de sodio y carbonato de potasio a 20°C y 60% de Humedad Relativa	104

Tabla 69. Cantidad máxima de agua adquirida por 25 kilogramos de carbonato de sodio y carbonato de potasio	105
Tabla 70. Humedad de Equilibrio para el Carbonato de sodio	106
Tabla 71. Humedad de Equilibrio para el Carbonato de potasio	107
Tabla 72. Resultados humedad de equilibrio y modelo Peleg	108
Tabla 73. Resultados de formación de carbonatos y bicarbonatos	109

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Carbonato de sodio anhidro	4
Figura 2. Curva de Solubilidad del Carbonato de Sodio	6
Figura 3. Proceso de elaboración del Carbonato de Sodio	8
Figura 4. Bodega de almacenamiento del Carbonato de sodio	11
Figura 5. Carbonato de potasio anhidro	12
Figura 6. Proceso de obtención del Carbonato de Potasio	13
Figura 7. Bodega de almacenamiento de Carbonato de Potasio	16
Figura 8. Tipos de humedad	18
Figura 9. Esquema que ilustra la diferencia entre adsorbente y adsorbente	20
Figura 10. Isotherma de sorción	21
Figura 11. Regiones de la isoterma de sorción de humedad	22
Figura 12. Tipos de isotermas de sorción	24
Figura 13. Esquema de valoración de carbonato con ácido clorhídrico en presencia de la fenolftaleína y el anaranjado de metilo.	29
Figura 14. Esquema de valoración de carbonato con ácido clorhídrico en presencia de la fenolftaleína y el anaranjado de metilo.	30
Figura 15. Diagrama de flujo del proceso experimental	36
Figura 16. Diseño experimental	38
Figura 17. Determinación del contenido de humedad inicial por método de la estufa	41
Figura 18. Determinación de humedad inicial de muestras en balanza de calentamiento infrarrojo	42
Figura 19. Secado de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio	43
Figura 20. Muestras secas de carbonato de sodio y carbonato de potasio	43
Figura 21. Recipientes de cristal herméticos	44
Figura 22. Uso de la herramienta SOLVER para estimar parámetros de modelos matemáticos	69
Figura 23. Bodega de almacenamiento productos químicos	102

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Uso industrial del Carbonato de sodio en el Ecuador, año 2011	9
Gráfico 2. Uso industrial del Carbonato de Potasio en el Ecuador, año 2011	13
Gráfico 3. Isotherma de sorción de humedad de carbonato de sodio a 15°C	63
Gráfico 4. Isotherma de sorción de humedad de carbonato de sodio a 25°C	63
Gráfico 5. Isotherma de sorción de humedad de carbonato de sodio a 35°C	64
Gráfico 6. Isotherma de sorción de humedad de carbonato de sodio a varias temperaturas	64
Gráfico 7. Isotherma de sorción de humedad de carbonato de potasio a 15°C	65
Gráfico 8. Isotherma de sorción de humedad de carbonato de potasio a 25°C	65
Gráfico 9. Isotherma de sorción de humedad de carbonato de potasio a 35°C	66
Gráfico 10. Isotherma de sorción de humedad de carbonato de potasio a varias temperaturas	66
Gráfico 11. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas desorción de humedad de carbonato de sodio a 15°C	77
Gráfico 12. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de potasio a 25°C	77
Gráfico 13. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de sodio a 35°C	78
Gráfico 14. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de potasio a 15°C	78
Gráfico 15. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de potasio a 25°C	79
Gráfico 16. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de potasio a 35°C	79
Gráfico 17. Regiones de la isoterma de sorción del carbonato de sodio	82
Gráfico 18. Regiones de la isoterma de sorción del carbonato de potasio	82
Gráfico 19. Formación teórica de bicarbonatos en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio	99

Gráfico 20. Carbonatos presentes en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio (teórico)	100
Gráfico 21. Bicarbonatos presentes en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio (análisis DPEC)	100
Gráfico 22. Carbonatos presentes en las muestras de carbonato de sodio y Carbonato de potasio (análisis DPEC)	101
Gráfico 23. Resultados para el carbonato de sodio	104
Gráfico 24. Resultados para el carbonato de potasio	104

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Datos de humedad relativa y temperatura mensual de los años 2000 al 2010 en estaciones metereológicas de Quito (Iñaquito) y Guayaquil (U. Estatal)	126
ANEXO B. Hoja técnica del carbonato de sodio	129
ANEXO C. Hoja técnica del carbonato de potasio	130
ANEXO D. Fichas de seguridad del carbonato de sodio anhidro y carbonato de potasio anhidro	131
ANEXO E. Norma INEN 1887 determinación humedad carbonato de sodio	135
ANEXO F. Actividades de agua de soluciones salinas a diferentes temperaturas	137
ANEXO G. Procedimiento experimental para la determinación de actividad de agua	138
ANEXO H. Relación de área y volumen de las muestras y el recipiente hermético	140
ANEXO J. Procedimiento experimental para la determinación de isothermas de sorción de humedad	143
ANEXO K. Resultados DPEC determinación de carbonatos y bicarbonatos	145
ANEXO L. Humedades de equilibrio para isothermas de sorción del carbonato de sodio a 15°C, 25°C, 35°C	158
ANEXO M. Humedades de equilibrio para isothermas de sorción del carbonato de potasio a 15°C, 25°C, 35°C	159
ANEXO N. Humedades de equilibrio de carbonato de potasio y carbonato de sodio calculadas por el modelo de BET	160
ANEXO P. Humedades de equilibrio de carbonato de potasio y carbonato de sodio	161

calculadas por el modelo de GAB

ANEXO Q. Humedades de equilibrio de carbonato de potasio y carbonato de sodio

calculadas por el modelo de D'ARCY AND WATT 162

ANEXO R. Ajuste de curvas de sorción de humedad para el carbonato de sodio con

cuatro modelos matemáticos a 15, 25 y 35°C 163

ANEXO S. Ajuste de curvas de sorción de humedad para el carbonato de potasio

con cuatro modelos matemáticos a 15, 25 y 35°C 170

GLOSARIO

ABSORCIÓN: es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase constituyéndose una "solución" con esta segunda.

ACTIVIDAD DE AGUA: es una medida del agua líquida disponible (agua de diferentes naturalezas) para reacciones químicas en un producto y se define como la relación que existe entre la presión parcial de vapor de agua en el equilibrio de la muestra (p_s) y la presión de vapor del agua pura en el equilibrio (p_0) a la misma temperatura.

ADSORCIÓN: proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello se considera como un fenómeno superficial. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase adsorbente se llama "adsorbente". En la adsorción de un gas en un sólido, el gas se adsorbe formando capas sucesivas.

AGUA: sustancia cuyas moléculas están formadas por la combinación de un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, líquida, inodora, insípida e incolora.

ALCALINIDAD: medida de la capacidad de un agua para neutralizar ácidos y bases, por lo general, se debe a los componentes de bicarbonato, carbonato e hidróxido presentes en un agua natural o tratada.

CARBONATOS: compuestos que contienen el ion carbonato CO_3^{2-} . Pueden considerarse derivados del ácido carbónico (H_2CO_3), que se forma al disolver dióxido de carbono (CO_2) en agua. Si los átomos de hidrógeno del ácido carbónico son reemplazados por átomos de un metal se forma un carbonato inorgánico, por ejemplo el carbonato de sodio o el carbonato de potasio.

CONSEP: Consejo Nacional de Control de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas. Es una Institución creada para el cumplimiento y aplicación de la Ley de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas, la cual contempla los mecanismos de prevención del uso indebido y la comercialización de las sustancias sujetas a fiscalización, la investigación y represión de los delitos tipificados en esta Ley y el tratamiento y rehabilitación de las personas afectadas.

CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SÓLIDO: se expresa por lo común como la cantidad de humedad por unidad de peso de sólido seco o húmedo.

DIÓXIDO DE CARBONO: gas incoloro, inodoro y con un ligero sabor ácido, cuya molécula consiste en un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno (CO_2). El dióxido de carbono es 1,5 veces aproximadamente más denso que el aire. Es soluble en agua en una proporción de un 0,9 de volumen del gas por volumen de agua a 20 °C.

HIDRATO: los hidratos contienen moléculas de agua que o bien están ligadas a un núcleo metálico o están cristalizadas con el complejo metálico. Tales hidratos se dice que poseen "agua de cristalización" o "agua de hidratación". Ésta es liberada cuando el hidrato es sometido a alta temperatura, la red se rompe y deja escapar una o más moléculas de agua.

HUMEDAD DE EQUILIBRIO: es la humedad a la cual se igualan: la humedad del sólido con la humedad de la atmósfera del aire que lo rodea y se define como la cantidad de masa total en base seca, cuando es sometido a condiciones controladas de temperatura y humedad relativa.

ISOTERMA DE SORCIÓN: curva que indica, en el equilibrio y para una temperatura determinada, la cantidad de agua retenida por un sólido higroscópico en función de la humedad relativa de la atmósfera que lo rodea.

MÉTODO GRAVIMÉTRICO PARA OBTENCIÓN DE HUMEDADES DE EQUILIBRIO: consiste en colocar pequeñas cantidades de muestra en un recipiente, en el interior del cual la humedad del aire y la temperatura se mantienen constantes.

Cuando al cabo de un tiempo se ha establecido el equilibrio entre el porcentaje de humedad de la muestra y el clima del recinto en que se encuentra, se obtiene así un punto de la isoterma de sorción de humedad.

MODELO: arquetipo o punto de referencia para imitarlo o reproducirlo. Reproducción ideal y concreta de un fenómeno con fines de estudio y experimentación.

MONOCAPA DE HIDRATACIÓN: agua fuertemente ligada. Esta monocapa se encuentra en equilibrio reversible con la disolución, ya que en cada instante un cierto número de moléculas se disuelven en la subfase y, simultáneamente, igual número de aquellas pasan a la película, de modo que estadísticamente el número de las que constituyen la monocapa permanece invariable.

PARÁMETRO: constante arbitraria que aparece en la ecuación de una curva, superficie, etc.

PRESIÓN: magnitud física que expresa la fuerza ejercida por un cuerpo sobre la unidad de superficie.

SORCIÓN: término utilizado especialmente, para denotar la habilidad de un producto higroscópico en el proceso de ganar o perder agua hasta alcanzar un estado de equilibrio.

Incluye la adsorción y la absorción conjuntamente, siendo una expresión general para un proceso en el cual un componente se mueve desde una fase para acumularse en otra, principalmente en los casos en que la segunda fase es sólida.

SUSTANCIA DELICUESCENTE: los materiales delicuescentes (del latín deliquescente, hacerse líquido) son sustancias (en su mayoría sales) que tienen una fuerte afinidad química por la humedad y que atrapan cantidades relativamente altas de agua si son expuestos a la atmósfera, formando una solución líquida.

SUSTANCIA HIGROSCÓPICA: material que tiene la capacidad de intercambiar agua con el medio ambiente. La sustancia higroscópica presenta una tensión de vapor de agua menor que la del agua pura a la misma temperatura.

TEMPERATURA: magnitud física que expresa el grado o nivel térmico de los cuerpos o del ambiente.

COMPORTAMIENTO DEL CARBONATO DE SODIO Y CARBONATO DE POTASIO A DIFERENTES HUMEDADES Y TEMPERATURAS AMBIENTALES

RESUMEN

Determinación de las isothermas de sorción de humedad, que relacionan la humedad de equilibrio del carbonato de sodio y carbonato de potasio, sustancias químicas higroscópicas controladas por el CONSEP, con la humedad relativa del aire o actividad de agua.

El estudio se realizó mediante siete soluciones salinas con actividades de agua en el rango de 0,04 a 0,89; a temperaturas de 15, 25 y 35 °C. Los datos empíricos se ajustaron a través de cuatro modelos matemáticos.

Se analizó la transformación química de las sales a sus respectivos bicarbonatos por la exposición al dióxido de carbono presente en el aire, a las mismas condiciones experimentales. La conversión se cuantificó por cálculos teóricos y análisis químico.

El modelo propuesto por Peleg se ajustó satisfactoriamente a los datos experimentales promedio de las sales, siendo un coeficiente de correlación de 0,9994 y error relativo de ajuste de 0,4268%.

Se concluye que el carbonato de sodio y carbonato de potasio adquirieron mayor humedad y composición en bicarbonatos con el incremento de la temperatura y la actividad de agua.

PALABRAS CLAVES:

CONSEP/CARBONATO DE SODIO/CARBONATO DE POTASIO/
HIGROSCOPICIDAD/ISOTERMAS DE SORCIÓN /MODELO DE PELEG/DIÓXIDO DE
CARBONO/ACTIVIDAD DE AGUA/ HUMEDAD RELATIVA

BEHAVIOR OF SODIUM CARBONATE AND POTASSIUM CARBONATE AT DIFFERENT TEMPERATURES AND HUMIDITY ENVIRONMENT

ABSTRACT

Determination of moisture sorption isotherms, which relate the equilibrium moisture sodium carbonate and potassium carbonate, hygroscopic chemicals controlled by CONSEP, with the relative air humidity or water activity.

The study was performed using seven saline solutions with water activities in the range of 0.04 to 0.89, at temperatures of 15, 25 and 35 ° C. The empirical data were adjusted through mathematical models.

Was analyzed the chemical transformation of these substances to their respective bicarbonates by exposure to carbon dioxide in the air, in the same experimental conditions. The conversion was quantified by chemical analysis and theoretical calculations.

The model proposed by Peleg was adjusted satisfactorily to the experimental data of sodium and potassium carbonate, with an average regression coefficient of 0.9994 and adjustment relative error of 0.4268%.

Were concluded Sodium carbonate and potassium carbonate became more moisture and bicarbonates composition with increasing temperature and water activity.

KEYWORDS:

CONSEP/SODIUM CARBONATE /POTASSIUM CARBONATE
/HIGROSCOPICITY/SORPTION ISOTHERMS/PELEG MODEL/CARBON
DIOXIDE/RELATIVE HUMIDITY/WATER ACTIVITY

INTRODUCCIÓN

Actualmente la Ley de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas del Ecuador, cuya aplicación y cumplimiento en el país, se atribuye como función al Consejo Nacional de Control de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas (CONSEP), no considera las variaciones de masa o composición de las sustancias químicas sujetas a fiscalización.

Siendo parte de estos el carbonato de sodio y carbonato de potasio, sales alcalinas caracterizadas por ser higroscópicas, es decir adquieren humedad hasta llegar a un límite en su contenido, definida como humedad de equilibrio. El efecto de la sorción de humedad puede afectar al producto y conducir a cambios físicos y químicos como la formación de hidratos, compactación e inclusive la transición de sólido a líquido como el caso del carbonato de potasio por ser deliquescente.

Otro efecto generado por la interacción del carbonato de sodio y carbonato de potasio con el aire medioambiental, es la reacción con el dióxido de carbono, produciéndose una transformación química a los correspondientes bicarbonatos; alterándose de este modo la composición del producto.

El CONSEP, desea establecer los rangos de tolerancias máximas para aplicarlas a los faltantes o excedentes de las sustancias químicas sujetas a fiscalización, para de este modo mejorar la estructura de control.

Se ve la necesidad de establecer un procedimiento experimental para determinar la humedad de equilibrio de sólidos higroscópicos como son el carbonato de sodio y carbonato de potasio, a diferentes humedades relativas y temperaturas ambientales.

El método estático o también denominado isopiéstico, es uno de los métodos empíricos, basado en el equilibrio entre el contenido de humedad del sólido y la del entorno medioambiental a

temperatura constante, representado por las denominadas isothermas de sorción de humedad, las cuales pueden ser ajustadas en modelos matemáticos que permiten predecir la humedad de equilibrio a diferentes condiciones ambientales.

El objeto de estudio es determinar la influencia de las condiciones del medio ambiente como temperatura ambiental, humedad relativa y presencia de CO_2 del aire en la composición fisicoquímica del carbonato de sodio y carbonato de potasio.

La información generada a través del presente estudio permitirá predecir la humedad de equilibrio del carbonato de sodio y carbonato de potasio a diversas condiciones ambientales, de este modo entidades de control como el CONSEP, podrán establecer la máxima cantidad de masa que estas sustancias obtendrán debido a su naturaleza higroscópica.

Los laboratorios y empresas, de acuerdo con los incisos dos y tres del Artículo 37 de la Codificación de la Ley de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas, deben comunicar mensualmente y por escrito, a la Secretaría Ejecutiva del CONSEP, los datos actuales, reales y precisos sobre la elaboración, existencia y venta de sustancias químicas sujetas a fiscalización; debido al incremento de masa, por efecto de la adquisición de humedad de los productos higroscópicos, se generan inconvenientes en el reporte de movimientos, por lo cual las entidades solicitan ajustes de inventario. El conocimiento y establecimiento de las condiciones adecuadas de almacenamiento de estas sustancias químicas, respecto a humedad y temperatura ambiental, permitirá reducir la ganancia de humedad y alteración de la composición en las mismas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Consejo Nacional de Control de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas (CONSEP)

“El CONSEP es una Institución creada para el control y fiscalización de precursores y sustancias químicas específicas teniendo funciones y atribuciones en todo el país para la aplicación y cumplimiento de la Ley de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas”¹.

“El CONSEP desea establecer los rangos de tolerancias máximas para aplicarlas a los faltantes o excedentes de los precursores químicos, tal como lo indica el artículo 96 de la Ley de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas”².

1.1.1 Misión. “El Consejo Nacional de Control de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas ejerce la rectoría de la política de Estado en materia de drogas, centrada en un enfoque integral, equilibrado y solidario, así como en el principio de responsabilidad compartida”³.

1.1.2 Visión. “El Consejo Nacional de Control de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas ha desarrollado en la nación ecuatoriana una cultura de prevención y control que coadyuva en la reducción en la oferta y demanda de drogas, encaminada al desarrollo sustentable del país”⁴

1.1.3 Sustancias químicas sujetas a fiscalización. El control de sustancias químicas sujetas a fiscalización y que se utilizan en industrias de todo tipo, está a cargo del Consejo Nacional de Control de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas, CONSEP.

Estas sustancias son:

Tabla 1. Sustancias químicas sujetas a fiscalización

<i>Productos Químicos Específicos</i>	
Acetona	Éter Etílico
Ácido Acético	Hexano
Ácido Clorhídrico	Hidróxido de Potasio
Ácido Sulfúrico	Hidróxido de Sodio líquido
Alcohol Isobutilico	Hidróxido de Sodio Sólido
Alcohol Isopropílico	Metil Etil Cetona
Amoniaco	Metil Isobutil Cetona
Anhídrido Acético	m – Xileno
Benceno	Óleum (Ácido Sulfúrico Fumante)
Benzol	o- Xileno
Bicarbonato de Sodio	Permanganato de Potasio
Bicarbonato y Carbonato de Potasio	p- Xileno
Carbonato de Sodio	Sulfato de Sodio
Cloruro de Calcio	Tolueno
Diacetona Alcohol	Toluol
Diclorometano	Tricloroetileno
Disulfuro de Carbono	Xileno-mezcla de isómeros
Éter de Petróleo	Xilol

Fuente: Codificación 25 Ley De Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas. Ecuador, 27 de diciembre de 2004. Artículo 128. Anexo IV. Cuadro II

1.2 Carbonato de Sodio



Figura 1. Carbonato de sodio anhidro

1.2.1 Generalidades. “El carbonato sódico es un compuesto químico de fórmula Na_2CO_3 . Se presenta en la naturaleza en forma anhidra o hidratada, como un polvo fino, inodoro e higroscópico de sabor alcalino.

Pertenece a la familia química de las sales alcalinas (carbonatos)”⁵.

Número CAS: 497-19-8

1.2.2 Formas del Carbonato de Sodio. El Carbonato de Sodio tiene varias presentaciones, como:

- *Soda ash o calcinada, carbonato de sodio anhidro* (Na_2CO_3), se ofrece en dos grados:
 - “*Tipo 1*: Carbonato de sodio liviano, el cual debe ser polvo fino de color blanco, cuya densidad aparente es menor de $0,86 \text{ g/cm}^3$ ”.
 - *Tipo 2*: Carbonato de sodio denso, debe ser un polvo granulado de color blanco, cuya densidad aparente mínima es de $0,86 \text{ g/cm}^3$ ”⁶.
- *Termonatrita o carbonato de sodio monohidratado* ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), “producto de transformación del carbonato de sodio anhidro expuesto al aire, siempre que la presión de vapor en la atmósfera sea superior a la que produce el monohidrato” ⁷.
- *Carbonato de sodio heptahidrato* ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), “este compuesto no es de interés comercial, debido a su estrecha escala de estabilidad, la cual se extiende desde 32 a 35,4 °C”⁸.
- *Sosa cristal, natrón, carbonato de sodio decahidratado* ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$), “esta sustancia usualmente forma grandes cristales transparentes. Estos cristales rápidamente efloran en aire seco, formando un residuo de hidratos más bajos, principalmente el monohidrato”⁹.

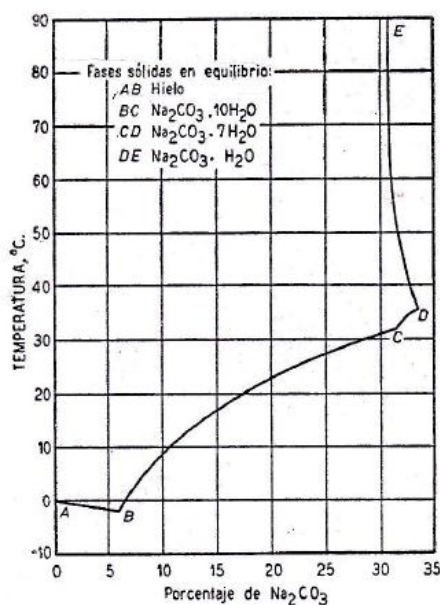


Figura 2. Curva de Solubilidad del Carbonato de Sodio

Fuente: KIRK, R. Enciclopedia de Tecnología Química. Primera edición. Hispanoamericana. Tomo III, México. p. 634

1.2.3 Propiedades del Carbonato de Sodio. Las propiedades fisicoquímicas del carbonato de sodio se detallan a continuación:

Tabla 2. Propiedades Físicas del carbonato de sodio anhidro

PROPIEDAD	VALOR
Masa molar, g/mol	84
Densidad a 19°C, g/ml	2,173
Índice de refracción	1,500
Punto de fusión, °C	851
pH	11,5 (50 g/l)

Fuente: PERRY, John. "Manual del ingeniero químico" Tomo II. Mc Graw Hill. pp. 2-26

Tabla 3. Propiedades Físicas de hidratos de carbonato de sodio

FÓRMULA QUÍMICA	ESTADO DE AGREGACIÓN	DENSIDAD, g/cm ³	MASA MOLAR, g/mol	ÍNDICE DE REFRACCIÓN	PUNTO DE FUSIÓN, °C
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Sólido	1,55	124,02	1,505-1,509	100°C
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sólido	1,51	232,12	-	35,1°C
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Sólido	1,46	286,16	1,425	33 °C

Fuente: PERRY, John. "Manual del ingeniero químico" Tomo II. Mc Graw Hill. pp. 2-26

Tabla 4. Datos de solubilidad del Carbonato de sodio anhidro

TEMPERATURA, °C	0	22	100	104
g Na ₂ CO ₃ /100 g H ₂ O	7,1	22	45,5	48,5

Fuente: PERRY, John. "Manual del ingeniero químico" Tomo II. Mc Graw Hill. pp.2-26

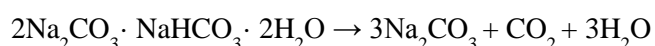
Tabla 5. Requisitos del Carbonato de sodio de uso industrial

REQUISITOS	UNIDAD	Tipo 1		Tipo 2		Método de ensayo
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
Carbonato de sodio expresado como Na ₂ CO ₃ (alcalinidad soluble total).	% m/m	98,5	-	98,5	-	INEN 1890
Bicarbonato de sodio expresado como NaHCO ₃	% m/m	-	0,1	-	0,1	INEN 1886
Cloruros expresados como NaCl	% m/m	-	0,7	-	0,7	INEN 1891
Humedad	% m/m	-	0,5	-	0,5	INEN 1887
Materia insoluble en agua a 50°C	% m/m	-	0,02	-	0,02	INEN 1889
Densidad	g/cm ³	0,45	0,55	0,9	1,0	INEN 1892
Sulfato expresado como Na ₂ SO ₄	% m/m	-	0,04	-	0,04	INEN 1885
Hierro expresado como Fe	mg/kg	-	35	-	35	INEN 1888
Metales expresados como Pb	mg/l	-	10	-	10	INEN 1893
Arsénico expresado como As	mg/l	-	0,5	-	0,5	INEN 1894

Fuente: NORMA INEN 1895. Carbonato de sodio para uso industrial. Requisitos. p.2

1.2.4 Obtención industrial. “La obtención de Na₂CO₃ anhidro, cuyo nombre comercial es sosa, se realiza en la industria por el proceso Solvay.

Parte del consumo mundial de carbonato de sodio es atendido por extracción de fuentes naturales. Por ejemplo por descomposición térmica el mineral “trona”, 2Na₂CO₃ · NaHCO₃ · 2H₂O, se produce carbonato de sodio”¹⁰:



“Las reacciones centrales del proceso Solvay son la III y la IV.

Las reacciones I y II tienen por objeto la preparación de la solución muestran en el esquema de NH₄HCO₃, los procesos V y VI generan el amoníaco necesario para la reacción II”¹¹:

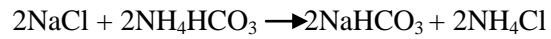
I. Obtención de CO₂:



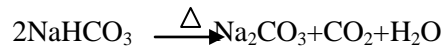
II. Obtención de NH₄HCO₃:



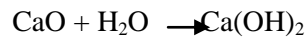
III. Obtención de NaHCO₃:



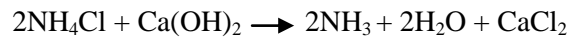
IV. Obtención de Na₂CO₃:



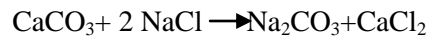
V. Obtención de Ca(OH)₂:



VI. Recuperación de NH₃:



VII. Ecuación global:



Este hidróxido de calcio se hace reaccionar con la solución de cloruro de amonio emergente de la torre de Solvay (ecuación VI) para así recuperar el amoníaco que se utilizó en la reacción representada por la ecuación II.

“Tal como lo muestra la ecuación global, el proceso industrial utiliza como materias primas piedra caliza (compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio) y cloruro de sodio. Los productos son el carbonato de sodio y el cloruro de calcio”¹².

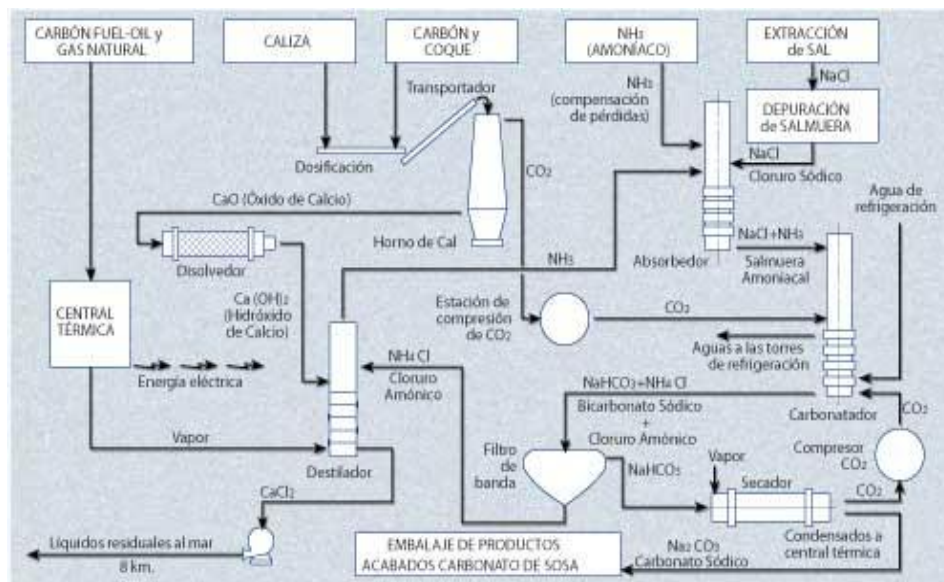


Figura 3. Proceso de elaboración del Carbonato de Sodio

1.2.5 Usos ilícitos. “Se emplea para preparar pasta básica de cocaína bruta, cocaína básica y otras sustancias, neutralizando el efecto del ácido”¹³.

“Las hojas secas de coca se humedecen con una solución alcalina para convertir la cocaína en una forma insoluble en agua. Para esta extracción inicial se han usado los carbonatos de sodio, potasio y calcio; el hidróxido de sodio (sosa cáustica), el óxido de calcio (cal viva) o el hidróxido de amonio (agua amoniacal)”¹⁴.

1.2.6 Usos del Carbonato de sodio en la actividad industrial ecuatoriana. De acuerdo con la información proporcionada por el CONSEP, respecto a las actividades industriales en las que se utiliza el Carbonato de sodio como materia prima, se obtuvo la siguiente gráfico informativo, tomando como referencia un mínimo de consumo anual de una tonelada métrica:

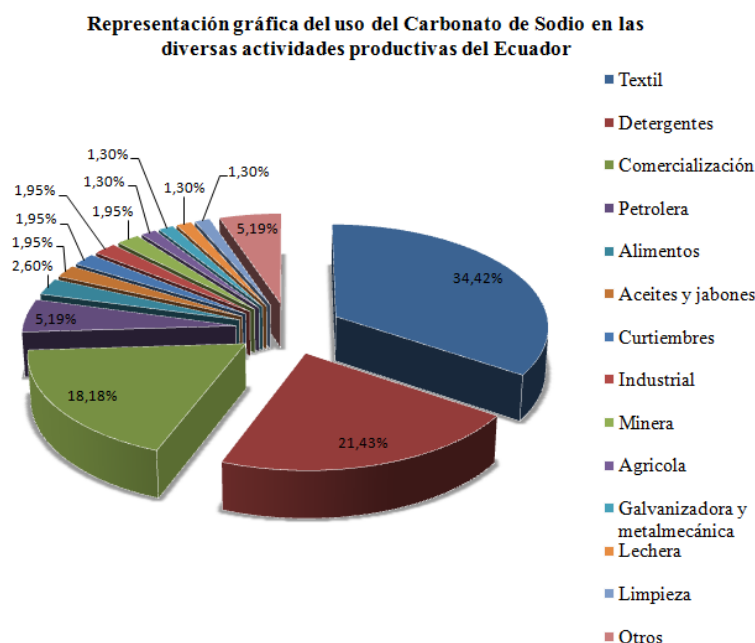


Gráfico 1. Uso industrial del Carbonato de sodio en el Ecuador, año 2011

Fuente: Base de datos CONSEP, 2011

Como se aprecia en el gráfico anterior, la industria textil es la actividad productiva que presenta mayor demanda del Carbonato de sodio.

a) Carbonato de sodio en la industria textil. “En la industria textil como acondicionador y fijador del color en las fibras con alto contenido de algodón”¹⁵.

b) Carbonato de sodio en la elaboración de detergentes y agentes de limpieza

El carbonato de sodio, se emplea como coadyuvante o relleno con jabones, surfactantes sintéticos y sustancias inorgánicas en la fabricación de limpiadores para superficies duras y para telas.

En la fabricación de detergentes, el carbonato de sodio es indispensable en las formulaciones al objeto de asegurar el correcto funcionamiento del resto de sustancias que lo componen, enzimas, tensoactivos, etc. durante las diferentes fases del lavado¹⁶.

c) Carbonato de sodio en la manufactura de vidrio. “En donde se utiliza alrededor del 50% del total producido. Al calentarlo a muy altas temperaturas se descompone dando lugar a Na_2O que da mayor fluidez al vidrio y disminuye su temperatura de fusión”¹⁷:

d) Carbonato de sodio en el tratamiento de aguas. “Los carbonatos son insolubles en agua excepto los carbonatos alcalinos y el de talio, por lo tanto el agregado de Na_2CO_3 , soluble, permite precipitar los restantes iones presentes en el agua, eliminando así aquellos iones (Ca^{2+} y Mg^{2+}) que contribuyen a la dureza del agua”¹⁸.

e) Otros usos industriales del carbonato de sodio

- El carbonato de sodio se utiliza en la industria del papel en la preparación de pastas a la soda y semiquímica.
- En la industria química para la preparación de soda caustica, obtención de sulfatos, sulfitos y fosfatos de interés industrial.
- Preparación de lodos de perforación para la extracción del petróleo
- Obtención de alúmina a partir de la bauxita
- Regeneración de resinas de intercambio iónico¹⁹.

1.2.7 Presentaciones de Carbonato de sodio. Los contenedores para el Carbonato de sodio de uso industrial sólido son generalmente bidones de fibra; bolsas de papel de capas múltiples, hechas de capas de papel kraft o combinaciones de papel kraft o papeles especiales con plásticos como el polietileno de baja densidad. Con contenido de 25, 40, 50 y 1000 kilogramos netos, en bidones de 125 y 180 kg y al granel en vagones tolva y camiones.



Figura 4. Bodega de almacenamiento del Carbonato de sodio

1.3 Carbonato de Potasio



Figura 5. Carbonato de potasio anhidro

1.3.1 Generalidades. “La sal anhidra se presenta como polvo o gránulos de color blanco, inodoro, delicuescente e insoluble en alcohol. Forma varios hidratos. Forma soluciones moderadamente alcalinas. Pertenece a la familia de sales inorgánicas alcalinas”²⁰.

“La sal anhidra es un polvo blanco delicuescente. Forma varios hidratos, de los cuales el $K_2CO_3 \cdot 1 \frac{1}{2} H_2O$ es la fase estable en contacto con la solución saturada a temperaturas de 0°C a, por lo menos, 130 °C. Los hidratos son también delicuescentes”²¹.

Sinónimos: *Barrilla, kailón, potasa Solvay, ceniza de potasa, perla Ash*

Número CAS: 584-08-7

1.3.2 Propiedades del Carbonato de Potasio. A continuación se describe algunas de las propiedades físicas de esta sal:

Tabla 6. Propiedades físicas Carbonato de Potasio anhidro

PROPIEDAD	VALOR
Masa molar, g/mol	138,2
Densidad a 19°C, g/ml	2,42
Índice de refracción	1,531
Punto de fusión, °C	891
pH	12 (sol. 10%)

Fuente: PERRY, John. "Manual del ingeniero químico" Tomo II. Mc Graw Hill. p. 2-24

Tabla 7. Datos de solubilidad del Carbonato de Potasio

TEMPERATURA, °C	0	100
g K_2CO_3 /100 g H_2O	105,5	156
g $K_2CO_3 \cdot 2 H_2O$ / 100 g H_2O	183	331
g $K_2CO_3 \cdot 3 H_2O$ / 100 g H_2O	129,4	268

Fuente: PERRY, John. "Manual del ingeniero químico" Tomo II. Mc Graw Hill. p.2-24

1.3.3 Obtención industrial. "El carbonato de potasio, se obtenía lixiviando cenizas de la madera u otros vegetales quemados"²².

"Hoy en día, el carbonato potásico es manufacturado en un reactor de lecho fluidizado. Esto de un producto que es anhidro, haciéndolo innecesario realizar cualquier proceso posterior para eliminar el agua de hidratación. El carbonato de potasio obtenido es un material granular blanco, denso, libre de fluir, que es fácil de manejar y guardar"²³.

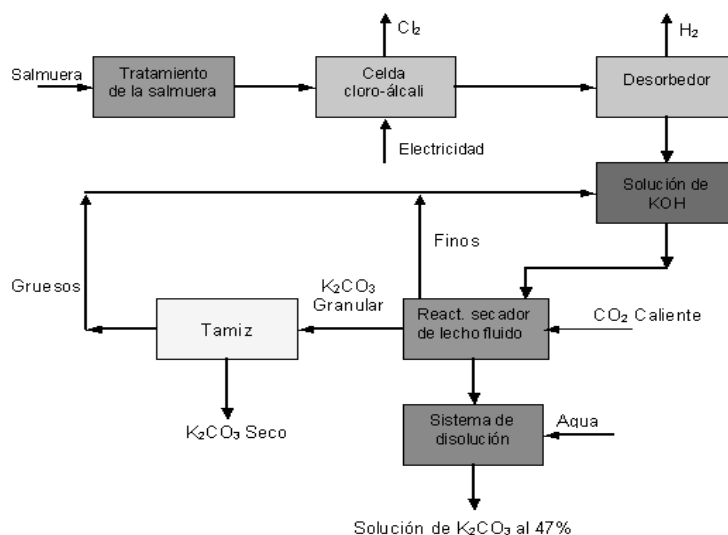
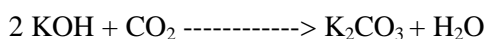
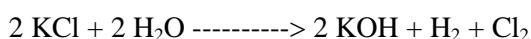


Figura 6. Proceso de obtención del Carbonato de Potasio

El proceso empieza con el cloruro de potasio, usado como materia prima (obtenido de mina). A través de una conversión electrolítica de la sal de KCl, se produce hidróxido de potasio (la potasa cáustica, KOH), cloro (Cl₂) e hidrógeno (H₂). El hidrógeno es una fuente de combustible mientras el cloro tiene numerosas aplicaciones importantes y variadas. La potasa cáustica líquida y anhídrido carbónico son los únicos materiales crudos requeridos para producir carbonato de potasio.

El carbonato de potasio seco puede disolverse fácilmente en agua para formar una solución líquida. Típicamente se recomienda una solución al 47% (peso) ²⁴.

Las reacciones para este proceso son:



1.3.4 Usos ilícitos. “Se le emplea como alcalinizante en la preparación de pasta de coca, cocaína básica y otras sustancias de elaboración clandestina. Tiene como sustituto al óxido de calcio, carbonato de calcio, bicarbonato de sodio”²⁵.

1.3.5 Usos del Carbonato de Potasio en la actividad industrial ecuatoriana. De acuerdo con la información proporcionada por el CONSEP, respecto a las actividades industriales en las que se utiliza el Carbonato de Potasio como materia prima, se obtuvo la siguiente figura informativa, tomando como referencia un mínimo de consumo anual de una tonelada métrica:

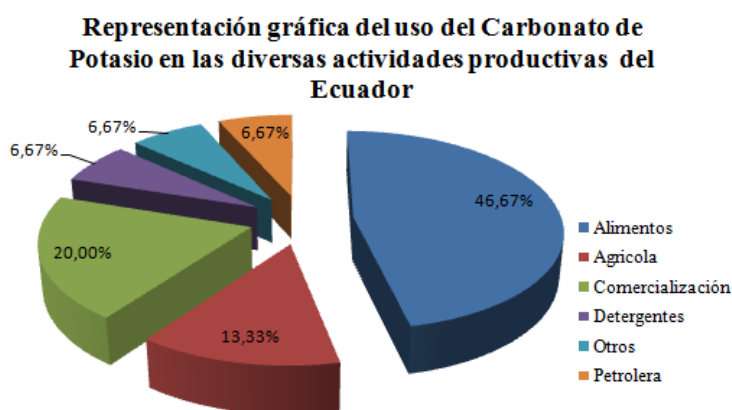


Gráfico 2. Uso industrial del Carbonato de Potasio en el Ecuador, año 2011

Fuente: Base de datos CONSEP, 2011.

Como se aprecia en el gráfico anterior, la elaboración de alimentos es la actividad productiva que presenta mayor demanda del Carbonato de Potasio.

Aunque la principal aplicación del carbonato de potasio es la fabricación de vidrio duro, interviene en la producción de gran variedad de sustancias, entre las cuales figuran: ácido oxálico, cianuro potásico, numerosos compuestos inorgánicos, aguas minerales, preparación de alimentos y perfumes, jabón líquido, artículos de tocador, vidriados de cerámica, heliografías, colores secos y tintas de imprimir.

También se usa en el curtido de pieles, en galvanoplastia, en la industria cervecera, en el lavado, blanqueado y teñido de tejidos y como agente deshidratante²⁶.

a) Carbonato de potasio en el proceso de elaboración de alimentos

Se emplea como antiaglomerante sintético, soporte para aditivos y corrector de la acidez.

Además se utiliza en los siguientes procesos:

- Elaboración de chocolates
- Elaboración de agua mineral con gas
- Elaboración de levaduras especiales
- Elaboración de cervezas
- Deshidratante de pasas y alfalfa
- Aditivo en la alimentación de ganado²⁷

b) Carbonato de potasio en los procesos de elaboración de artículos de limpieza

“Utilizado como un álcali en el tratamiento de calderas, jabones líquidos y detergentes”²⁸.

c) Carbonato de potasio en los procesos de purificación de gases. Purificación del H_2S y CO_2 por la absorción en una solución del carbonato de potasio, por ejemplo: gas natural, síntesis del amoníaco, hidrógeno, gas natural, productos petroquímicos²⁹.

d) Procesos de Elaboración de Cristales. La razón por la que se usa carbonato de potasio en aplicaciones de vidrio como en la fabricación de tubos de televisión, ampollitas, tubos fluorescentes, tubos de cristal, cristal óptico, cristal de laboratorio, se debe a que es más compatible con los óxidos de plomo, bario y estroncio requeridos³⁰.

e) Otros usos industriales del carbonato de potasio

- Fabricación de fertilizantes especiales
- Elaboración de químicos inorgánicos
- Elaboración de sales potásicas de fosfatos, silicatos, permanganatos, persulfatos.
- Inhibición de la corrosión
- Elaboración de gomas y adhesivos
- Procesos de Elaboración de Pigmentos para Tintas

- Fabricación de tintas
- Elaboración de colores secos
- Proceso de teñido e impresión de textiles³¹.

1.3.6 Presentaciones de Carbonato de Potasio. Los contenedores para el Carbonato de Potasio de uso industrial sólido son generalmente bidones de fibra; bolsas de papel de capas múltiples, hechas de capas de papel kraft o combinaciones de papel kraft o papeles especiales con plásticos como el polietileno de baja densidad. Con contenido de 25, 50 y 1000 kilogramos netos.



Figura 7. Bodega de almacenamiento de Carbonato de Potasio

1.4 Humedad Relativa del Aire

“Es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica. Esta es la forma más habitual de expresar la humedad ambiental. Se expresa en tanto por ciento.

$$RH = \frac{p_{(H_2O)}}{p_{0(H_2O)}} \quad (1)$$

Donde:

$p_{(H_2O)}$ es la presión parcial de vapor de agua en la mezcla de aire;

$p_{0(H_2O)}$ es la presión de saturación de vapor de agua a la temperatura en la mezcla de aire; y
RH es la humedad relativa de la mezcla de aire que se está considerando”³².

1.5 Sólidos Solubles

El comportamiento de un sólido soluble es diferente a un insoluble. En este caso si la presión de vapor de agua en el aire es inferior a la tensión de vapor de la solución saturada del sólido, la solución saturada precipitará sólido conforme se elimine el agua con la que está en contacto. En caso contrario si la presión parcial del agua en el aire es mayor que la tensión de vapor de la solución saturada del sólido, el sólido adsorbe humedad del aire y se disuelve (delicuescente) formándose en primer lugar una solución saturada y como la tensión de vapor de esta solución es inferior a la del líquido puro, el equilibrio solo se alcanzará cuando esta sea igualada a la tensión de vapor de la solución³³.

1.6 Sólidos Insolubles

“Un sólido insoluble en presencia del líquido puede comportarse de dos maneras: como húmedo o como higroscópico”³⁴.

1.6.1 Sólido Húmedo. “Es aquel cuya tensión de vapor del agua que acompaña el sólido es igual a la presión parcial del agua pura a la misma temperatura”³⁵.

$$p_0 = p_s \quad (2)$$

1.6.2 Sólido Higroscópico. “Es aquel que tiene una tensión de vapor del agua que acompaña el sólido inferior a la presión parcial del agua pura a la misma temperatura, es decir el sólido modifica la tensión de vapor del agua que está retenida entre sus poros”³⁶.

1.7 Humedad del Sólido

1.7.1 Contenido de humedad, en base húmeda. “Es la que expresa la humedad de un material como porcentaje del peso del sólido mojado, se define como”³⁷:

$$X_h = \frac{\text{masa agua}}{\text{masa sólido húmedo}} \quad (3)$$

$$\%X_h = \frac{\text{masa agua}}{\text{masa sólido húmedo}} * 100 \quad (4)$$

1.7.2 Contenido de humedad, en base seca. “Es la masa de agua que acompaña a la masa del sólido seco”³⁸. Se expresa como:

$$X = \frac{\text{masa agua}}{\text{masa sólido seco}} \quad (5)$$

1.7.3 Humedad de equilibrio X^* . El vapor de agua que acompaña al aire ejerce una presión de vapor determinada y se alcanzará las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire. Además representa el límite al que puede llevarse el contenido de humedad del sólido³⁹.

Si $X^* > X$ El sólido se humedece; $X^* < X$ El sólido se seca

“La humedad de equilibrio se puede adsorber como una película superficial, o bien, condensarse dentro de los capilares finos del sólido a presión reducida, y su concentración variará con la temperatura y la humedad del aire que lo rodea”⁴⁰.

1.7.4 Humedad Libre. “Representa la diferencia de humedades entre la humedad del sólido y la humedad de equilibrio, por consiguiente es la humedad que puede perder un sólido en contacto con aire, en condiciones determinadas”⁴¹.

$$\text{Humedad libre} = X - X^* \quad (6)$$

1.7.5 Humedad no ligada. “Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura”⁴².

1.7.6 Humedad ligada. “Es la humedad mínima necesaria para que el sólido deje de comportarse como higroscópico. Cuando la humedad del sólido es baja, la tensión de vapor es inferior a la del líquido puro a la misma temperatura por tanto la presencia del sólido influye sobre la volatilidad del agua, estando el agua en estas condiciones está ligada al sólido”⁴³.

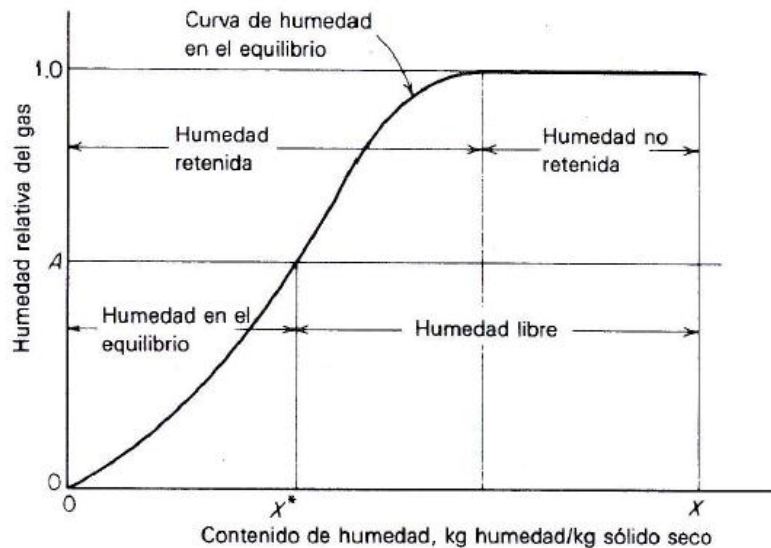


Figura 8. Tipos de humedad disponibles en un sólido

Fuente: TREYBAL, R. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill. México.p. 728

1.8 Definición de Actividad de Agua

“La actividad de agua es un parámetro intrínseco, estrechamente ligado a la humedad de un sólido”⁴⁴.

Los sólidos poseen agua con diferentes disponibilidades: agua de la monocapa de hidratación o fuertemente ligada; por encima de la monocapa, se encuentran capas sucesivas de agua que representan el agua débilmente ligada; luego se encuentra el agua libre. El agua enlazada incluye las moléculas unidas en forma química a través de puentes de hidrógeno a grupos iónicos o polares. Mientras que el agua libre es la que no está unida físicamente al sólido y se puede congelar o perder con facilidad por evaporación o secado⁴⁵.

La actividad de agua (a_w) es una medida del agua líquida disponible (agua de diferentes naturalezas) para reacciones químicas en un producto y se define como la relación que existe entre la presión parcial de vapor de agua en el equilibrio de la muestra (p_s) y la presión de vapor del agua pura en el equilibrio (p_0) a la misma temperatura; siendo por esta razón un número sin unidades y con un valor que varía entre 0 y 1⁴⁶.

Si se considera una solución ideal, con solutos en muy reducida concentración, este término puede expresarse de la siguiente manera⁴⁷:

$$a_w = \frac{f}{f_0} = \frac{p_s}{p_0} = \frac{HR}{100} = \frac{M_a}{M_a + M_s} \quad (7)$$

Donde:

f = fugacidad del disolvente de la solución

f_0 = fugacidad del disolvente puro

HR = humedad relativa

p_s = presión de vapor del agua del sólido

p_0 = presión de vapor del agua pura

M_s = moles de soluto

M_a = moles de agua

$\frac{p_s}{p_0}$ = presión de vapor relativa

1.9 Determinación de la Humedad de Equilibrio

“El contenido de humedad de equilibrio de un material higroscópico se determina de diferentes maneras, y el único requisito consiste en una fuente de temperatura constante y aire a humedad variable. La determinación se puede realizar en condiciones estáticas o dinámicas”⁴⁸.

1.9.1 Método Gravimétrico. “Un procedimiento estático sencillo consiste en colocar varias muestras en desecadores de laboratorio ordinarios que contengan soluciones salinas saturadas, que produzcan atmósferas de humedades relativas también conocidas. La muestra de cada desecador se pesa periódicamente hasta obtener un peso constante”⁴⁹.

“Cuando se coloca dos sustancias de diferente contenido de humedad en un recipiente hermético, independientemente de la cantidad de las mismas dispuesta en el mismo, siempre y cuando el espacio de aire sea pequeño, no existirá intercambio de humedad. Esto es porque los dos productos están en equilibrio entre sí, es decir poseen el mismo estado termodinámico definido por el potencial químico”⁵⁰.

1.10 Isotermas de Sorción de Humedad

1.10.1 Generalidades. “La actividad del agua es una propiedad intrínseca y se relaciona de manera no lineal con el contenido de humedad mediante las curvas o isotermas de adsorción y desorción. Para entender esto, considérese un sólido higroscópico, almacenado a una temperatura determinada en una cámara herméticamente cerrada; al cabo de algún tiempo, su presión de vapor provocará la transferencia de moléculas de agua y la cámara adquirirá una humedad relativa constante que estará en equilibrio con el contenido de agua del sólido”⁵¹.

“Las isotermas de “sorción” o de equilibrio se definen como la representación gráfica de la relación existente entre el contenido de humedad de un producto en equilibrio con la humedad relativa y temperatura del ambiente que lo rodea”⁵².

1.10.2 Adsorción. “La adsorción es un concepto aceptado por la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) para indicar el enriquecimiento o empobrecimiento de uno o más componentes en la superficie del sólido, conocida como interfase. Se llama adsorbente al sólido en el cual se lleva a cabo la adsorción, y adsorbato a la sustancia que se adsorbe en el adsorbente.

Si un sólido se introduce en un sistema cerrado en el cual se halla gas o vapor, éste último comenzará a adsorberse y se observará una disminución de la presión del entorno. Dentro de un cierto tiempo, la presión permanece constante y el peso del adsorbente es mayor que su peso inicial, con lo cual se llega al estado de equilibrio entre el sólido y el gas”⁵³.

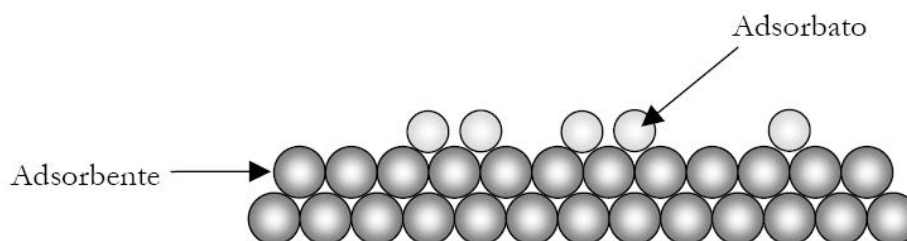


Figura 9. Esquema que ilustra la diferencia entre adsorbente y adsorbente

1.10.2.1 Adsorción física. “Es un fenómeno fácilmente reversible, es el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida. Cuando las fuerzas atractivas intermoleculares entre un sólido y un gas son mayores que las existentes entre

moléculas del gas mismo, el gas se condensará sobre la superficie del sólido, aunque su presión sea menor que la presión de vapor que corresponde a la temperatura predominante.

La sustancia adsorbida no penetra dentro de la red cristalina ni se disuelve en ella, sino que permanece totalmente sobre la superficie. Sin embargo, si el sólido es muy poroso y contiene muchos pequeños capilares, la sustancia adsorbida penetrará en estos intersticios si es que la sustancia humedece al sólido”⁵⁴.

1.10.2.2 Adsorción química.” Denominada también adsorción activada, es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. La fuerza de la unión química puede variar considerablemente y puede suceder que no se formen compuestos químicos en el sentido usual; empero, la fuerza de adhesión es generalmente mucho mayor que la observada en la adsorción física. El proceso frecuentemente es irreversible; en la desorción, de ordinario se descubre que la sustancia original ha sufrido un cambio químico”⁵⁵.

1.10.3 Isotermas de sorción. “El término “sorción” se usa especialmente, para denotar la habilidad de un producto higroscópico en el proceso de ganar o perder agua hasta alcanzar un estado de equilibrio.

La isoterma de sorción es la relación de dependencia, a una temperatura constante de la cantidad de adsorbato adsorbido por peso unitario de adsorbente, con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio”⁵⁶.

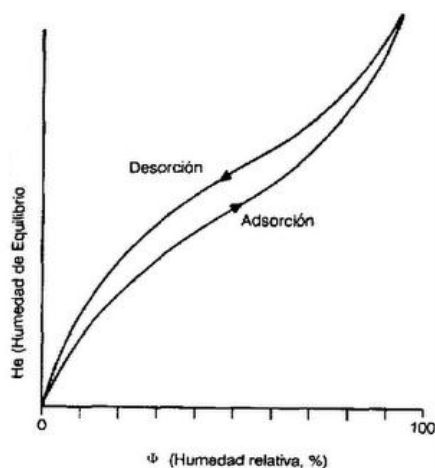


Figura 10. Isoterma de sorción

1.10.4 Desorción. “El proceso de desorción se inicia con un estado húmedo del producto. Es el efecto contrario a la adsorción. La isoterma de desorción es obtenida al colocar inicialmente un material húmedo bajo las mismas humedades relativas pero midiendo por pérdida de peso.

Es importante determinar la humedad inicial del producto. Se lo realiza mediante técnicas de laboratorio de secado”⁵⁷

1.10.5 Absorción. “Es un proceso físico o químico en el cual la sustancia transferida pasa de una fase a otra (por ejemplo líquida), incorporándose al volumen de la segunda fase para formar una “disolución”⁵⁸.

1.10.6 Regiones de la isoterma de sorción. Una isoterma de sorción de humedad generalmente muestra tres regiones, su amplitud depende del estado del agua presente en el sólido higroscópico.

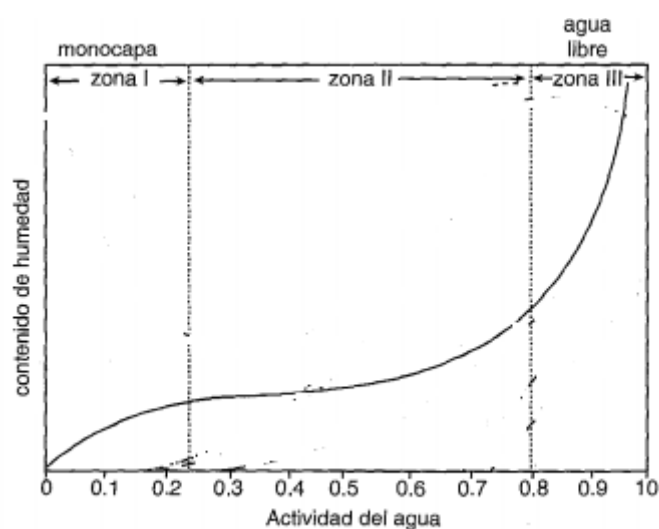


Figura 11. Regiones de la isoterma de sorción de humedad

Fuente: BADUI, S. “Química de los alimentos”. p.24

A continuación se describen con detalle las regiones de las isotermas de sorción:

1.10.6.1 Primera región. En esta región, el agua se encuentra fuertemente ligada y no está disponible para reaccionar con otros componentes. Representa la adsorción de una película molecular de agua, entre 0 y 25 de aw.

La humedad al final de la primera región e inicio de la segunda región corresponde a la monocapa. El contenido de agua en dicho punto es crítico.

El valor de monocapa corresponde a la cantidad máxima de agua que puede ser fuertemente ligada a la materia seca.

El contenido de humedad en la monocapa puede ser calculado usando varios modelos matemáticos para las isothermas de sorción de humedad, los que comúnmente se utilizan son el modelo de BET (Brunauer-Emmett-Teller) y el modelo de GAB (Guggenheim Anderson-de Boer) ⁵⁹.

1.10.6.2 Segunda región. "Representa a la adsorción de las demás capas adicionales sobre la monocapa, se localiza entre 0,25 y 0,80 de humedad relativa.

La segunda región es la zona de la curva representa la capacidad que tiene un producto de mantenerse estable mientras capta o elimina agua (Bell&Labuza, 2000). En esta zona intermedia existe un equilibrio entre las moléculas que conectan con la capa monomolecular y las que se alejan de ella, gracias a la suficiente energía cinética"⁶⁰.

1.10.6.3 Tercera región. "Localizada sobre los 0,75 de humedad relativa, representa el agua condensada en los poros del material, provocando una disolución de los materiales solubles presentes. Es la fracción de agua libre que se encuentra en estado líquido y que queda retenido en la superficie del sustrato seco únicamente por la fuerza de capilaridad. El agua de los capilares es libre de reaccionar, se congela fácilmente"⁶¹.

1.10.7 Tipos de isothermas de sorción de humedad

1.10.7.1 Isotherma Tipo I o tipo Langmuir. "Es característico de procesos en los que se produce el llenado de los microporos. Es el caso típico de los carbones activos. Su interpretación se contempla fundamentalmente desde el punto de vista de la teoría potencial de Polanyi-Dubinin"⁶².

1.10.7.2 Isotherma Tipo II. "Es característico de procesos de adsorción en sólidos no porosos o macroporosos. Representa el caso de adsorción en mono-multicapa, cuyo estudio queda perfectamente definido mediante el modelo B.E.T. Es característico el llamado punto B, que indica el momento en el que se completa la monocapa. Un ejemplo típico de este grupo lo constituyen los grafitos no porosos"⁶³.

1.10.7.3 Isotherma III o de Flory Huggins. "Es la llamada concava, ocurre cuando la interacción adsorbato-adsorbato es mayor que la de adsorbente-adsorbato. Muestra la forma de sorción en sustancias puras y cristalinas"⁶⁴.

1.10.7.4 Isoterma Tipo IV. “Su parte inicial es semejante a la de la isoterma tipo II, pero a presiones medias comienza la condensación capilar en mesoporos. A partir de la rama de desorción de estas isothermas se puede determinar la distribución de tamaños de los poros. Las sílices y alúminas son ejemplos representativos”⁶⁵.

1.10.7.5 Isoterma Tipo V. “Es una variación del Tipo II en el rango de actividades de agua bajas, presenta baja interacción adsorbente-adsorbato, pero se diferencia de la anterior en el segmento inicial de la curva”⁶⁶.

1.10.7.6 Isoterma Tipo VI. “Es un tipo particular de isothermas en forma de escalones derivada de la adsorción de agua a nivel de monocapa, se presenta para adsorbentes con superficies muy uniformes y homogéneas”⁶⁷.

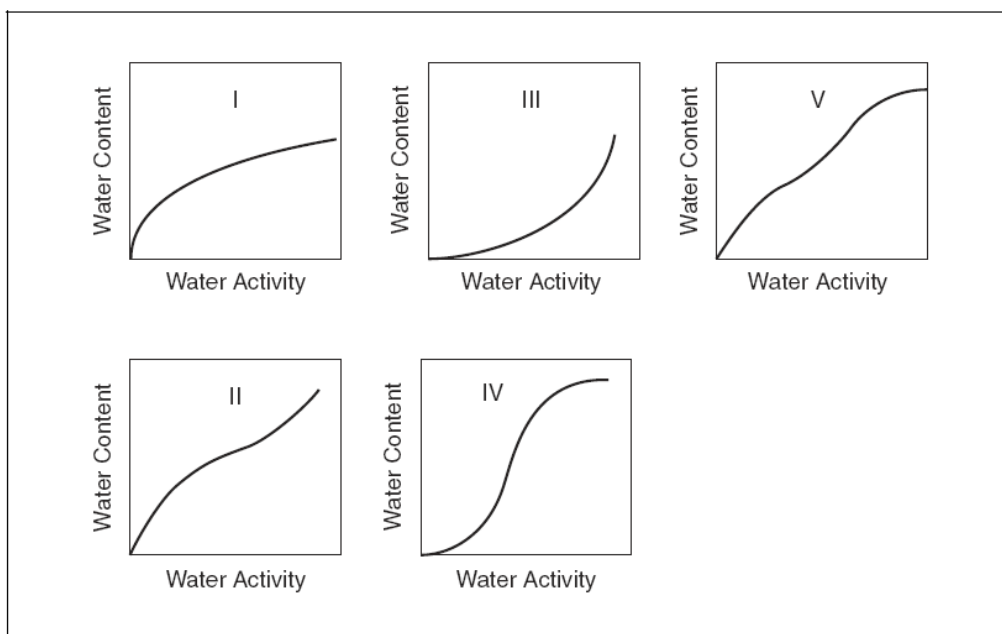


Figura 12. Tipos de isothermas de sorción

1.11 Modelos Matemáticos para Interpretar las Isothermas de Sorción

“Varias ecuaciones empíricas y semiempíricas se han propuesto para correlacionar el contenido de humedad de equilibrio de un sólido higroscópico con la actividad de agua. En numerosas ocasiones se ha intentado, a partir de mecanismos de adsorción, desarrollar expresiones matemáticas para describir el equilibrio isotérmico de la adsorción, cada una con un nivel de complejidad diferente, y que van desde expresiones empíricas hasta las teóricas, teniendo como base las propiedades fisicoquímicas y termodinámicas”⁶⁸.

“La mayor ventaja de utilizar modelos matemáticos para predecir una isoterma de sorción de humedad, se basa en el uso de pocos datos experimentales para predecir una isoterma válida. Además, mediante interpolación o extrapolación se puede obtener fácilmente los puntos de los extremos de baja y de alta a_w , extremos en los cuales puede ser difícil la determinación experimental”⁶⁹.

1.11.1 Modelo de Brunauer-Emmett-Teller (BET). “El modelo BET, asume que la superficie es homogénea y no porosa y que las moléculas del gas se adsorben sobre la superficie en capas sucesivas, completas o no, en equilibrio dinámico entre sí y con las moléculas del gas”⁷⁰.

“La ecuación de sorción de Brunauer, Emmett y Teller (BET) representa una base en la interpretación de isothermas multicapas de sorción y ha sido aplicada en adsorción de gases y vapores en superficies y sólidos porosos, como también en absorción de vapor, especialmente de agua, por polímeros y otros materiales homogéneos”⁷¹.

“Las formas linealizadas de las ecuaciones de isothermas, estiman el rango de aplicabilidad para los tramos que realmente tienen comportamiento lineal, los gráficos de BET, resultan lineales solamente en el rango de actividad acuosa de: $0,05 < a_w < 0,35$ - $0,4$.

$$\frac{a_w}{(1 - a_w) * X^*} = \frac{1}{m * C} + \left[\frac{C - 1}{m * C} \right] * a_w \quad (8)$$

Donde:

X^* = Contenido de humedad en equilibrio (g agua/100 g Sólido Seco)

a_w = Actividad de Agua

m = Contenido de humedad de la monocapa (% en base seca)

C = Constante relacionada con la diferencia de energía de las moléculas de sorbato de la primera capa y las otras capas restantes

Restricciones: $C \geq 1$; $m \geq 1$ ⁷²

1.11.2 Modelo de Anderson, de Boer y Guggenheim (GAB). “La isoterma de GAB ha sido satisfactoriamente probada en datos de adsorción de gases, como en absorción de vapor soluciones altamente concentradas de electrolitos, alimentos, proteínas y otros materiales”⁷³.

“Es una extensión de la ecuación de BET, teniendo en cuenta las propiedades modificadas del agua adsorbida en la región multicapas, siendo el modelo muy utilizado para predecir datos de niveles de actividad de agua de aproximadamente 0,9.

Cuando $K=1$, la ecuación de GAB se convierte en la ecuación de BET linealizada.

$$\frac{X^*}{m} = \frac{CKa_w}{(1 - Ka_w)(1 - Ka_w + CKa_w)} \quad (9)$$

Donde:

X^* = Contenido de humedad en equilibrio (g agua/100 g Solido Seco)

a_w = Actividad de Agua

m = Contenido de humedad de la monocapa (% en base seca)

C = Constante cinética relacionada a la sorción en la primera capa

K = Constante correctiva que describe las propiedades de adsorción de agua más allá de la monocapa.

Restricciones: $C \geq 1$; $m \geq 1$ ⁷⁴

1.11.3 Modelo de PELEG. “Modelo matemático empírico de 4 parámetros, que realiza el ajuste mediante regresión no lineal. Este modelo ha sido aplicado con éxito a todo tipo de isothermas”⁷⁵.

“El modelo de Peleg es más flexible al momento de modelar una curva, por la existencia de un parámetro más respecto a los otros modelos, es capaz de modelizar correctamente los datos experimentales a cualquier temperatura independientemente de la forma de la isoterma y en todo rango de actividad de agua.

Ecuación de Peleg

$$X^* = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2} \quad (10)$$

Donde:

X^* : Contenido de humedad en equilibrio (% base seca)

a_w : Actividad de Agua

$K_1; K_2; n_1; n_2$ = Constantes de Peleg

Restricciones: $n_1 > 1; n_2 < 1$ ⁷⁸

1.11.4 Modelo de D'Arcy and Watt. “La ecuación desarrollada por D'Arcy and Watt es aplicable para describir la sorción de agua en materiales heterogéneos.

$$X^* = \frac{kk'(aw)}{1 + k(aw)} + C(aw) + \frac{LL'(aw)}{1 - L(aw)} \quad (11)$$

Donde:

X^* : Contenido de humedad en equilibrio (% base seca)

a_w : Actividad de Agua

C: Constante cinética relacionada a la sorción en la primera capa

k, k', L, L': Constantes del modelo⁷⁹

1.12 Influencia de CO₂ en la Formación de Bicarbonatos

1.12.1 Ley de Henry. La solubilidad de los gases en el agua se calcula con la ley de Henry, la cual establece que la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión parcial de ese gas en contacto con el líquido.

Matemáticamente, una de las expresiones de la ley de Henry se presenta como:

$$[X_{(aq)}] = KP_X \quad (12)$$

Donde:

$[X_{(aq)}]$: es la concentración o solubilidad del gas (solute) en el líquido, expresada como mol gas/ l solución.

P_X : es la presión parcial del gas por encima del líquido, generalmente expresada en atmósferas.

K: es la constante de la ley de Henry aplicable a un gas en particular a una temperatura dada. Las unidades de K son $\text{mol l}_{\text{solución}}^{-1} \text{atm}^{-1}$.

Al calcular la solubilidad de un gas en agua, debe hacerse una corrección para la presión parcial del vapor de agua sustrayéndola de la presión total del gas⁸⁰.

1.12.2 Alcalinidad. La alcalinidad es una medida de la capacidad de un agua para neutralizar ácidos y bases, por lo general, se debe a los componentes de bicarbonato, carbonato e hidróxido presentes en un agua natural o tratada, describiéndose por la siguiente relación:

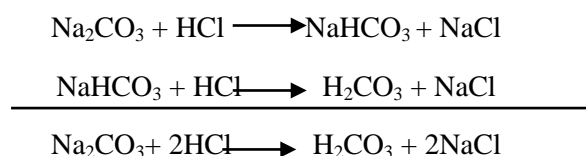
$$\text{Alcalinidad total} = 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{CO}_3\text{H}^-] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+]$$

Los [] indican concentración en mol/l y la alcalinidad total tiene unidades de equivalentes gramo/litro.

La concentración de iones bicarbonato y carbonato está directamente relacionada con el pH del agua y la concentración del carbono inorgánico disuelto a través de la disociación del ácido carbónico.

Se determina la alcalinidad por la titulación con una solución valorada de ácido sulfúrico, a los puntos sucesivos de equivalencia del bicarbonato y el ácido carbónico, bien sea electrométicamente o por medio de indicadores, definiéndose de esta manera las titulaciones de alcalinidad a la fenolftaleína y total⁸¹.

a) Determinación de carbonatos en una mezcla. La interacción entre Na_2CO_3 y ácido puede considerarse como una reacción, que se verifica en dos etapas:



Primer punto de equivalencia. Ya que el pH de la disolución de bicarbonato es igual a 8,31 para la determinación del primer punto de equivalencia es necesario tomar en calidad de indicador la fenolftaleína.

Al determinar la concentración de Na_2CO_3 , utilizando la fenolftaleína como indicador, en el cálculo es necesario multiplicar por 2 el volumen de disolución valorada gastado, en ml⁸².

Segundo punto de equivalencia. Un método más preciso de determinar el carbonato consiste en su valoración no hasta el primer punto de equivalencia (o sea, hasta NaHCO_3), sino hasta el segundo (H_2CO_3).

En este método de determinación de carbonato, tanto como en el caso de determinación del bicarbonato, el pH en el segundo punto de equivalencia será igual a 3,84, y es preciso valorar en presencia de anaranjado de metilo⁸³.

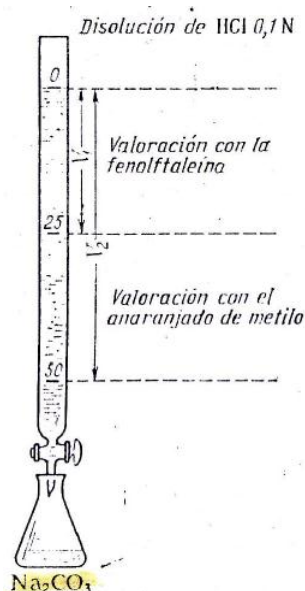
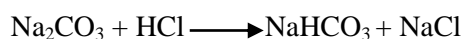
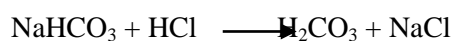


Figura 13. Esquema de valoración de carbonato con ácido clorhídrico en presencia de la fenolftaleína y el anaranjado de metilo.

b) Determinación de carbonatos y bicarbonatos en una mezcla. En el curso de la neutralización de una mezcla de carbonato y bicarbonato se verifica primeramente la reacción:



Luego transcurre la segunda reacción:



es decir, el bicarbonato se transforma en el ácido carbónico.

Cuando se termine la primera reacción, el pH de la disolución será igual a 8,31 (en este momento la disolución contiene NaHCO_3 solamente). Con ello será gastada sólo la mitad del ácido, equivalente a toda la cantidad de Na_2CO_3 .

(Volumen de carbonato = $2 \times$ Volumen de ácido gastado para titular en presencia de fenolftaleína).

En el momento de terminar la segunda reacción del hidrocarbonato se convertirá en H_2CO_3 , y el pH de la disolución será igual a 3,84. Para entonces será valorado todo el NaHCO_3 , tanto el que se ha formado a partir de Na_2CO_3 , como el que se encontraba antes en la mezcla. Por consiguiente, el volumen de ácido, gastado en la valoración adicional con el empleo del anaranjado de metilo, es equivalente a la segunda mitad de carbonato y todo el hidrocarbonato⁸⁴.

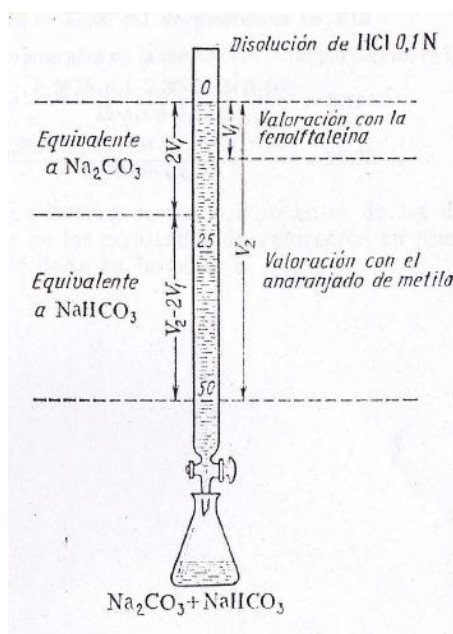


Figura 14. Esquema de valoración de carbonato con ácido clorhídrico en presencia de la fenolftaleína y el anaranjado de metilo.

1.12.2.1. Relaciones de alcalinidad. Los resultados obtenidos a partir de las determinaciones de fenolftaleína y alcalinidad total ofrecen un medio de clasificación estequiométrica de las tres formas principales de alcalinidad presentes.

- La alcalinidad de carbonato (CO_3^{2-}) se presenta cuando la de la fenolftaleína no es cero, sino menor que la total.
- La alcalinidad de hidróxido (OH^-) se presenta si la de la fenolftaleína supera la mitad de la total.
- La alcalinidad de bicarbonato (HCO_3^-) se presenta si la de la fenolftaleína es menor de la mitad de la total.
- Estas relaciones pueden calcularse mediante el siguiente esquema donde:
- P es el volumen de ácido para determinar la alcalinidad de la fenolftaleína
- T el volumen total (volumen de ácido para determinar la alcalinidad a la fenolftaleína y al anaranjado de metilo) ⁸⁵:

Tabla 8. Relaciones de alcalinidad

RESULTADO DE LA TITULACIÓN	ALCALINIDAD DE HIDRÓXIDOS	ALCALINIDAD DE CARBONATOS	ALCALINIDAD DE BICARBONATOS
P=0	0	0	T
P<1/2 T	0	2P	T-2P
P=1/2 T	0	2P	0
P>1/2 T	2P-T	2(T-P)	0
P=T	T	0	0

Fuente: Oocities.org. [en línea][Fecha de consulta: 02 de mayo 2012] Disponible en:

<<http://www.oocities.org/edrochac/residuales/alcalinidad.pdf>>

1.12.3 Dióxido de carbono, CO_2 . “Es un gas incoloro, inodoro y con un ligero sabor ácido, cuya molécula consiste en un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno (CO_2).

El dióxido de carbono se produce por diversos procesos: por combustión u oxidación de materiales que contienen carbono, como el carbón, la madera, el aceite o algunos alimentos; por la fermentación de azúcares, y por la descomposición de los carbonatos bajo la acción del calor o los ácidos”⁸⁶.

Tabla 9. Propiedades del CO₂

PARÁMETRO	VALOR
Punto de sublimación	-78,5°C(a presión atmosférica)
Punto triple	-56,6°C
Temperatura crítica	31°C
Presión crítica	72,80 atm
Densidad del CO ₂ (gas)	1,976 g/l a 0°C y 1 atm
Densidad del CO ₂ (líquido)	0,914 kg/l a 0°C y 34,3 atm
Densidad del CO ₂ (sólido)	1,512 kg/l a -56,6°C °C
Solubilidad en agua	1,713 vol CO ₂ /vol H ₂ O a 0°C

Fuente: KIRK, R. Enciclopedia de Tecnología Química. Primera edición.
Hispanoamericana. Tomo III, México. p. 718

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Proceso experimental seleccionado

El contenido de humedad de equilibrio de un material higroscópico se determina de diferentes maneras, y el único requisito consiste en una fuente de temperatura constante y aire a humedad variable. La determinación se puede realizar en condiciones estáticas o dinámicas.

El método experimental seleccionado consiste en el ***Método Gravimétrico***, un procedimiento estático sencillo que consiste en colocar varias muestras en desecadores de laboratorio ordinarios que contengan soluciones salinas saturadas, que produzcan atmósferas de humedades relativas también conocidas. La muestra de cada desecador se pesa periódicamente hasta obtener un peso constante.

A partir de los datos experimentales obtenidos, se construirán las isotermas de “sorción” o de equilibrio, definidas como la representación gráfica de la relación existente entre el contenido de humedad de un producto en equilibrio con la humedad relativa y temperatura del ambiente que lo rodea.

2.1.1 Descripción del proceso experimental

2.1.1.1 Obtención de muestras para la experimentación. Las muestras requeridas para cada experimentación, deben ser carbonatos de sodio y carbonato de potasio de grado industrial; mantenidas a un reducido tiempo de almacenamiento en bodega.

2.1.1.2 Determinación de humedad inicial de las muestras. Establecer el grado de humedad adquirido por estas sustancias y compararlo con las especificaciones de este parámetro en sus respectivas hojas técnicas.

El método para determinar la humedad inicial es el gravimétrico, el cual consiste en determinar la masa de una muestra antes y después de ser sometida a un procedimiento de calentamiento adecuado, mediante el cual pierde su contenido de agua. La pérdida de masa se expresa en porcentaje.

2.1.1.3 Acondicionamiento de las muestras. La muestra debe ser desecada hasta obtener una humedad cercana a cero. La temperatura y el tiempo dependerán del producto. El tamaño de muestra adecuado es de 1-3 gramos, manteniendo homogeneidad.

2.1.1.4 Preparación de las soluciones saturadas para la generación de humedad relativa conocida. Las soluciones acuosas salinas a concentración de saturación, deben mantenerse en forma de suspensión durante todo el período de equilibrio.

Esto se puede superar mediante la adición de sales en la solución cuando la cámara se abre para el pesaje de la muestra. Puesto que sólo la actividad de agua, de la una solución saturada se conoce, es importante que los cristales sin disolver de las sales estén presentes durante y después del equilibrio, ya que este es el único indicador de saturación. La humedad relativa de la solución después de la saturación no cambiará de manera significativa.

2.1.1.5 Recipientes herméticos. Las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio, contenidas en viales previamente tarados, deben ser almacenadas a una temperatura determinada en una cámara herméticamente cerrada; al cabo de algún tiempo, su presión de vapor provocará la transferencia de moléculas de agua y la cámara adquirirá una humedad relativa constante que estará en equilibrio con el contenido de agua del sólido.

2.1.1.6 Medición de la actividad de agua de las soluciones saturadas. La determinación de este parámetro, puede llevarse a cabo a partir de un equipo medidor de actividad de agua, en el cual se relacionan automáticamente las presiones de vapor de la solución saturada y del agua a la temperatura de la lectura.

2.1.1.7 Tiempo de equilibrio. La superficie del sobrenadante de la solución saturada y la superficie de la muestra debe tener una relación de 10:1. El volumen de la muestra con relación al recipiente o cámara que lo contiene debe ser de 1:20. Estas relaciones influyen en el tiempo de equilibrio. Ver cálculo en Anexo H.

Si la cantidad de la muestra comienza a acercarse al volumen total de aire, la presión de vapor de agua en el espacio no puede ser mantenido adecuadamente por la evaporación de la superficie de la solución salina saturada. El tiempo requerido para alcanzar el equilibrio en una muestra frente a una actividad de agua moderada puede ser de 3 a 5 días.

2.1.1.8 Medición de la humedad de Equilibrio de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio. Se pesó cada vial en intervalos de tres días para registrar el cambio de masa; para lo cual se extrajo cada vial del recipiente y se llevó al desecador para que se estabilice a la temperatura ambiental. Luego, se midió la masa de cada uno.

El procedimiento descrito anteriormente se efectuó para las temperaturas de 15°C, 25°C y 35°C.

La humedad de equilibrio se determinó a partir de gravimetría.

2.1.1.9 Construcción de las isotermas de sorción. A partir de los datos experimentales obtenidos, se obtendrán las isotermas de “sorción” o de equilibrio, definidas como la representación gráfica de la relación existente entre el contenido de humedad de un producto en equilibrio con la humedad relativa y temperatura del ambiente que lo rodea.

2.1.2 Diagrama de flujo del proceso experimental

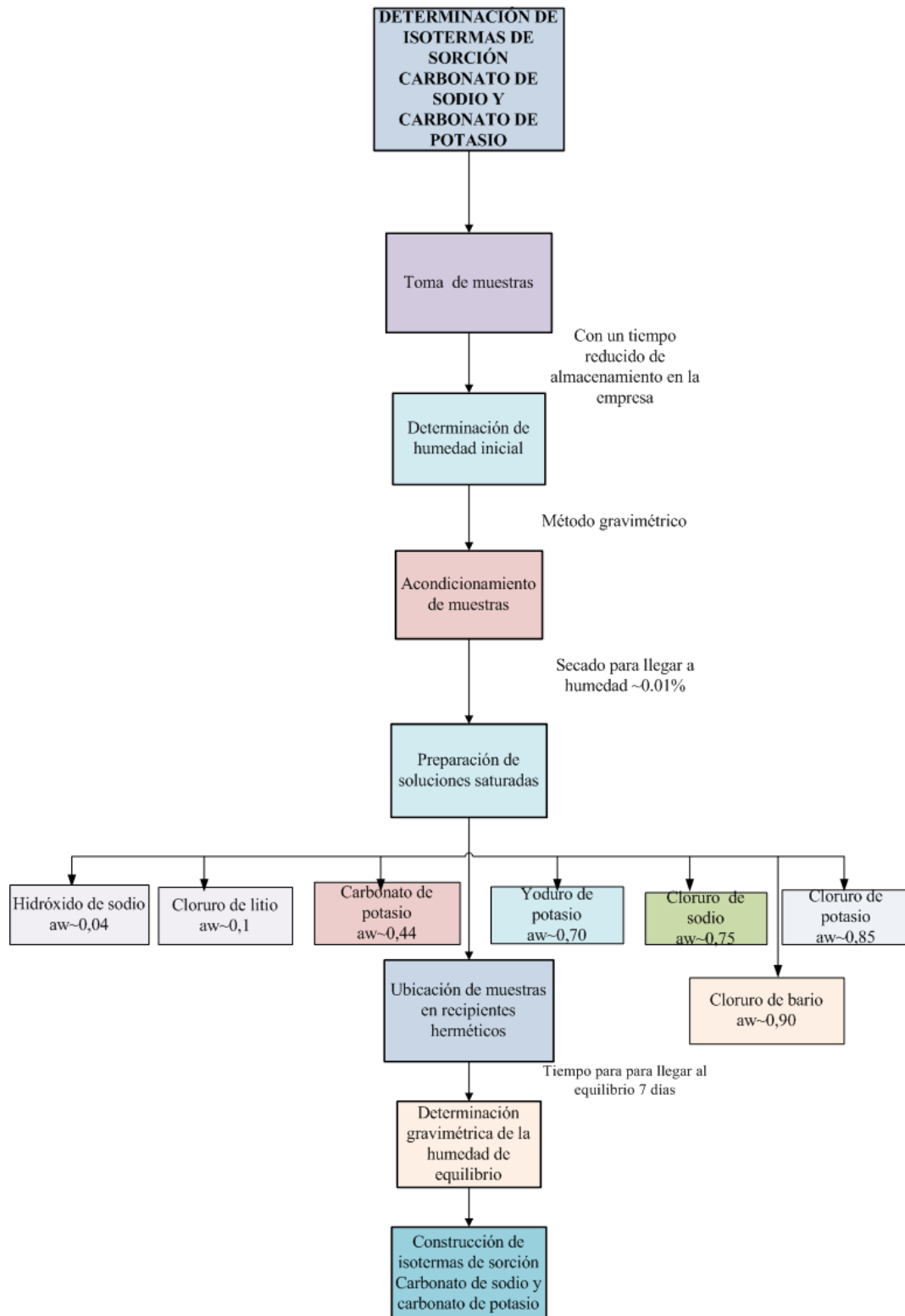
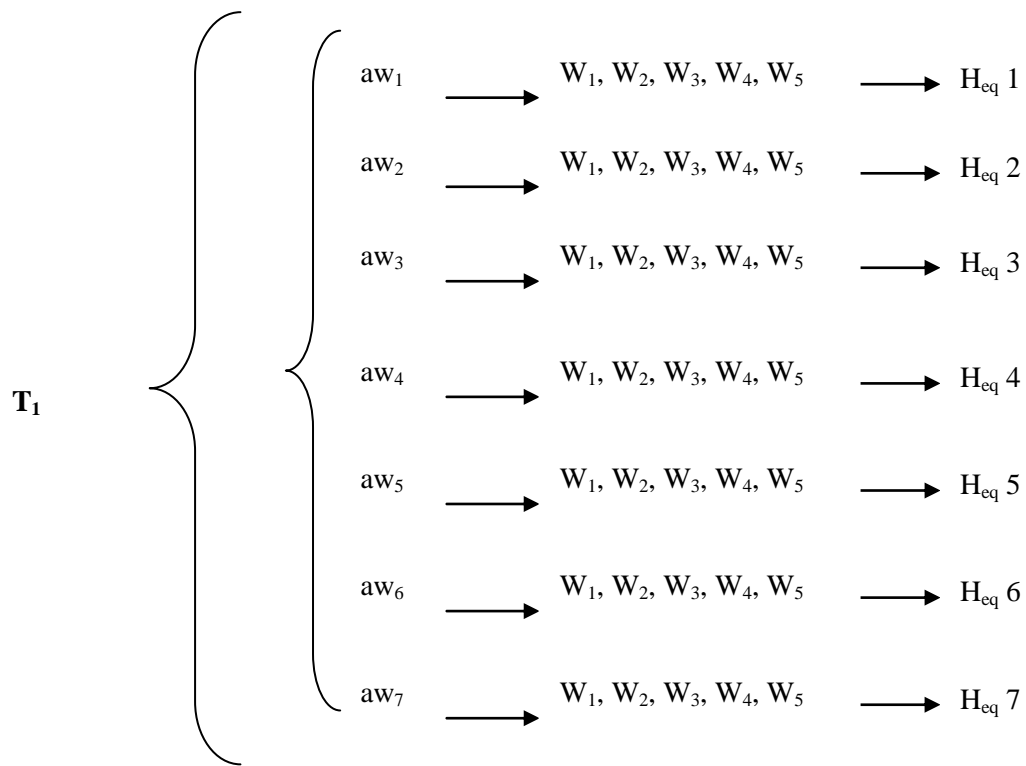


Figura 15. Diagrama de flujo del proceso experimental

2.2 Diseño experimental

El método estático consistió en colocar cinco réplicas de muestra en frascos herméticos que contienen siete soluciones saturadas de sales de actividad de agua (a_w) conocida, mantenidas a temperatura T_1 ; cuya masa (W) se controló al final del periodo de equilibrio (7días), para determinar la humedad de equilibrio correspondiente H_{eq} . Este proceso se repitió a las temperaturas T_2 y T_3 . El diseño experimental para la construcción de las isothermas de sorción de humedad es el siguiente:



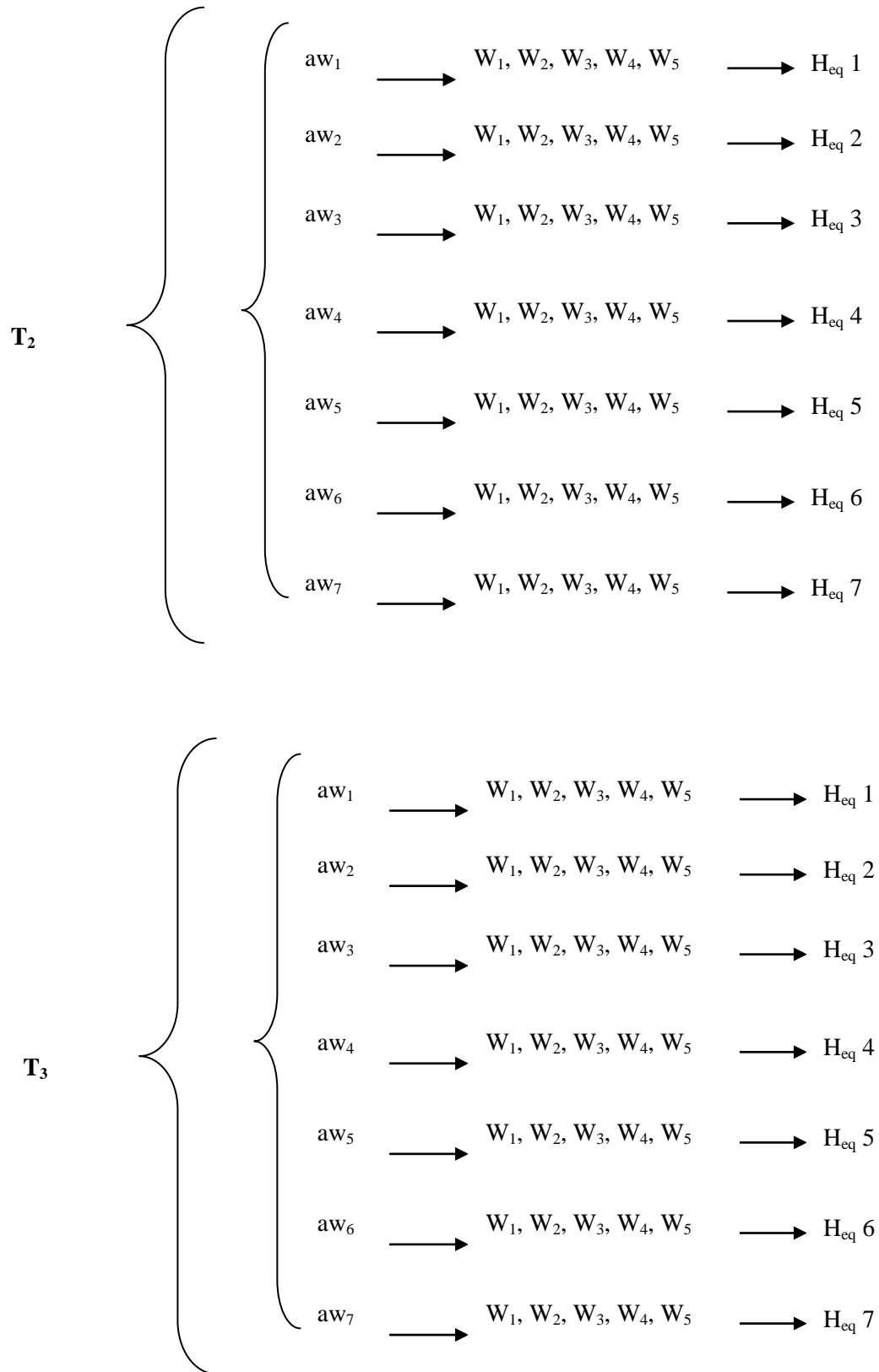


Figura 16. Diseño experimental

Donde:

T= Temperatura de la experimentación, °C

aw = Actividad de agua

W= Réplicas de las muestras

H_{eq}=Humedad de equilibrio (gramos de agua/100 gramos de sólido seco)

2.3 Materiales y Equipos

- Agitador de vidrio
- Balanza analítica, marca Boeco. (Ap.=± 0,0001 g).
- Baño térmico, marca Memmert. (Ap.= ± 0,5°C)
- Desecador de vidrio
- Estufa de temperatura regulable, marca Memmert. Apreciación= ± 0,5°C
- Frascos con cierre hermético, capacidad de 1000 ml
- Medidor de actividad de agua AQUALAB modelo Pawkit (Ap= ±0,01 aw)
- Pinzas metálicas
- Porta viales
- Probeta (Ap±1 ml); (Rango: 0-50ml)
- Recipientes metálicos para secado
- Tapones plásticos
- Termobalanza, marca ADAM. Modelo PMB 53. Apreciación:0,001 g
- Termómetro (Ap±0,5 °C); (Rango: -25 a 55°C)
- Viales, capacidad de 12 ml
- Vidrios de reloj

2.4 Sustancias y Reactivos

- | | |
|------------------------|-------------------------------------|
| - Agua destilada | H ₂ O (l) |
| - Carbonato de sodio | Na ₂ CO ₃ (s) |
| - Carbonato de potasio | K ₂ CO ₃ (s) |
| - Cloruro de bario | BaCl ₂ (s) |
| - Cloruro de Litio | LiCl(ac) |
| - Cloruro de potasio | KCl (s) |

- Cloruro de bario	BaCl ₂ (s)
- Cloruro de Litio	LiCl(ac)
- Cloruro de potasio	KCl (s)
- Cloruro de sodio	NaCl (s)
- Hidróxido de sodio	NaOH (s)
- Sílica gel	SiO ₂ .nH ₂ O (s)
- Yoduro de potasio	KI (s)

2.5 Desarrollo de pruebas experimentales

2.5.1 Determinación de las Isotermas de Sorción de Humedad. “Para la mayoría de sistemas secos, las actividades de agua de 0,001 a 0,92 son útiles para obtener una isoterma.

Para un procedimiento óptimo se utiliza tres temperaturas para incrementar la confianza al momento de interpolar o extrapolar”⁸⁷.

Las isotermas de sorción de humedad del carbonato de sodio y carbonato de potasio anhidros se obtuvieron a tres temperaturas distintas, 15°C, 25°C y 35°C y con actividades de agua desde 0,1 a 0,89. Este rango de temperaturas y actividades de agua (que equivalen a las humedades relativas del aire) cubren las condiciones atmosféricas máximas, medias y mínimas tanto en la ciudad de Quito y Guayaquil, desde el año 2000 al 2010, según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INHAMI), ver Anexo A.

Se partió del método gravimétrico, que consistió en exponer a las muestras a atmósferas de humedades relativas generadas por soluciones salinas saturadas (Ver tabla 10) en recipientes herméticos, dispuestos en cámaras a temperatura constante hasta llegar al equilibrio.

Se realizaron cinco repeticiones en cada experimentación tanto para el carbonato de sodio como para el carbonato de potasio.

2.5.2 Obtención de muestras para la experimentación. Las muestras de carbonato de potasio anhidro y carbonato de sodio anhidro sólidos se tomaron directamente de las empresas: QUIMICA SUPERIOR UNICHEM S.A y PROCESOS & COLORES, respectivamente. Se adquirió una cantidad de 2 kilogramos de cada sustancia que se encontraba siendo utilizada en los procesos productivos de cada entidad, para disponer de esta manera de una muestra con un reducido tiempo de almacenamiento en bodega.

Se dispuso de las hojas técnicas de cada sustancia, ver Anexo B y C.

2.5.3 Medición humedad inicial de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio. Se manipuló el carbonato de sodio y carbonato de potasio de acuerdo con las fichas de seguridad disponibles en el Anexo D.

Se determinó la humedad inicial de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio, para establecer el grado de humedad adquirido por estas sustancias y compararlo con las especificaciones de este parámetro en sus respectivas hojas técnicas.

a) Determinación del Contenido de Humedad por el método gravimétrico

Se basó en la Norma INEN 1887 (Ver anexo E). El método consistió en determinar la masa de una muestra antes y después de ser sometida a un procedimiento de calentamiento adecuado, mediante el cual pierde su contenido de agua. La pérdida de masa se expresa en porcentaje.



Figura 17. Determinación del contenido de humedad inicial por método de la estufa

b) Determinación del contenido de humedad por medio de un analizador

Existe como método alternativo de calentamiento por medio de la lámpara halógena integrada o infrarroja. La balanza de humedad está diseñada para la determinación rápida y automática del contenido de humedad en sólidos o líquidos utilizando una fuente de calor infrarroja.



Figura 18. Determinación de humedad inicial de muestras en balanza de calentamiento infrarrojo

Se utilizó la Termobalanza marca ADAM, modelo PMB 53, cuyo procedimiento de uso se detalla a continuación:

- Ajustar el proceso de prueba en “Humedad”.
- Establecer la temperatura para calentamiento.
- Definir el tiempo de calentamiento.
- Determinar el modo de inicio del modo “manual”.
- Colocar una cacerola vacía de muestra en el analizador, tarar la termobalanza y pesar la muestra.
- Dispersar la muestra de modo que cubra la superficie de la cacerola.
- Pulsar la tecla “Start” y esperar que se ejecute el ensayo.

El contenido de humedad, se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$\%H = \frac{m - m_1}{m} * 100 \quad (13)$$

%H=contenido de humedad, porcentaje en masa

m=masa inicial de la muestra, en gramos.

m₁=masa final de la muestra (seca), en gramos.

2.5.4 Preparación de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio. “La muestra debe ser secada hasta obtener una humedad cercana a cero. La temperatura y el tiempo dependerán del producto.

Las muestras deben ser homogéneas, donde un tamaño de muestra de 1-3 gramos es adecuado”⁸⁸.

Se colocaron 200 gramos de la muestra sobre una bandeja de acero inoxidable recubierta de papel aluminio, y se dispuso en la estufa a una temperatura de 105°C. Se controló la pérdida de masa por intervalos de 2 horas hasta que se estabilice la masa de las muestras.



Figura 19. Secado de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio

Posteriormente, las muestras fueron almacenadas en botellas con cierre hermético y éstas en un desecador para mantener las muestras secas en condiciones estables.



Figura 20. Muestras secas de carbonato de sodio y carbonato de potasio

2.5.5 Descripción del equipo

2.5.5.1 Preparación de recipientes herméticos. Se utilizaron envases de cristal de 1 litro de capacidad, de tapa hermética y con un conducto de salida para someter a vacío. Se incorporó una manguera de látex como conducto de acople. Se emplearon tapones de balón aforado de 10 ml para cerrar el extremo de la manguera. En el interior de los frascos se colocaron porta viales plásticos con la finalidad de colocar sobre estos los viales con las muestra.

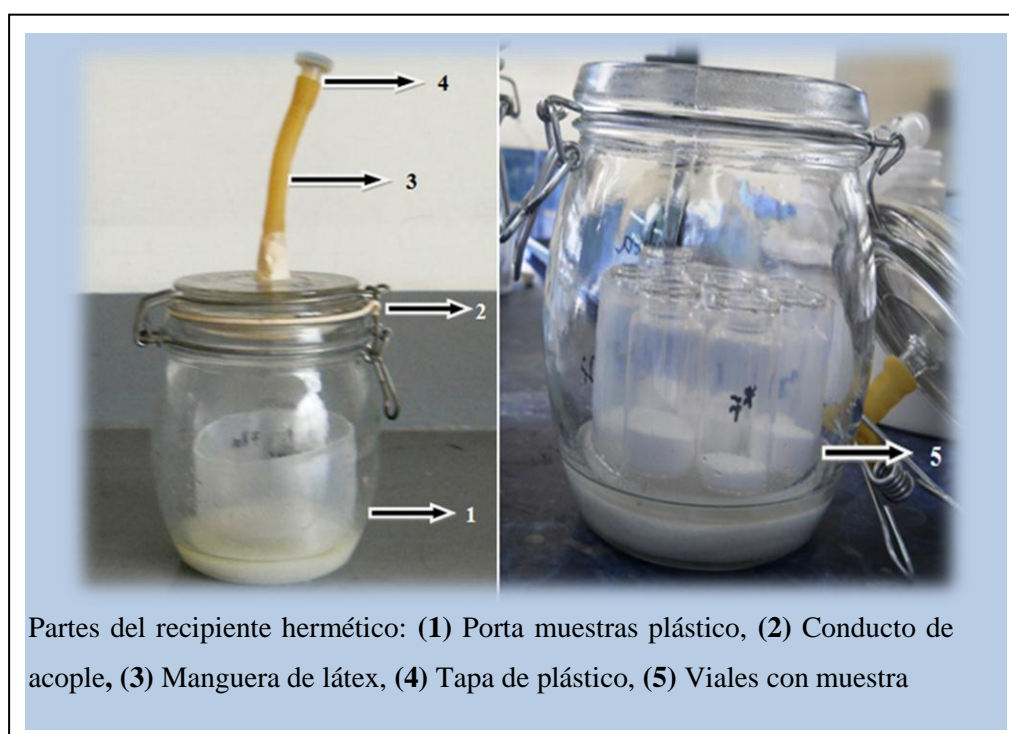


Figura 21. Recipientes de cristal herméticos

2.5.5.2 Tratamiento de los viales. Los viales o tubos de vidrio de 12 mililitros de capacidad fueron lavados con agua destilada y secados a 110 °C por un tiempo de 3 horas. Luego, se trasladaron a un desecador.

2.5.6 Preparación de las soluciones saturadas para la generación de humedad relativa conocida. Para la preparación de las soluciones acuosas salinas a concentración de saturación se tomó en cuenta la información proporcionada en el trabajo de grado de POAQUIZA, Delia. (2008) y de la documentación del CIRAD, respecto a la Determinación de isothermas de sorción, descrita en la Tabla 10. Las actividades de agua de las soluciones salinas saturadas a diferentes temperaturas se muestra en el Anexo F.

Tabla 10. Especificaciones de las soluciones salinas saturadas para las isotermas de sorción de humedad a 25°C

Sal	Masa, g	Agua	Observación
Hidróxido de sodio, NaOH	100	50 ml	Añadir la sal lentamente
Cloruro de litio, LiCl	79	46 ml + 2 ó 3 ml después de 24 horas	Sobre agua añadir lentamente la sal y el resto de agua y sal hasta terminar. Mezclar con la varilla constantemente.
Carbonato de potasio, K ₂ CO ₃	100	47 ml	Añadir la sal lentamente
Yoduro de potasio, KI	100	40 ml	Sobre agua añadir lentamente la sal y el resto de agua y sal hasta terminar. Mezclar con la varilla constantemente.
Cloruro de sodio, NaCl	100	28 ml + 3 ml después de 24 horas	Sobre agua añadir lentamente la sal y el resto de agua y sal hasta terminar. Mezclar con la varilla constantemente.
Cloruro de potasio, KCl	100	30 ml + 4 ml después de 24 horas	Sobre agua añadir lentamente la sal y el resto de agua y sal hasta terminar. Mezclar con la varilla constantemente.
Cloruro de bario, BaCl ₂	100	23 ml	Sobre agua añadir lentamente la sal y el resto de agua y sal hasta terminar. Mezclar con la varilla constantemente.

Fuente: CIRAD-AMIS-PPA, (2000), Procedimiento de operación : Determinación de isotermas de sorción p. 8-9

Se prepararon con el rango de actividad de agua de 0,04 a 0,89; usando agua destilada y siete sales químicamente puras. Se tuvieron cuidados especiales en el manejo de algunas soluciones saturadas muy cáusticas (como la de hidróxido de sodio y cloruro de potasio) y otras bastante tóxicas (cloruro de litio).

Se introdujo las soluciones en los recipientes, de modo que cubran el fondo de los mismos. Se observó que los cristales no estén por encima de la capa líquida, la cual no debe ser de más de 1,5 a 2 milímetros de espesor. Los frascos se colocaron a la temperatura de 25°C por una semana.

2.5.6.1 Medición de la actividad de agua de las soluciones saturadas. Se tomaron alícuotas de las soluciones saturadas con la ayuda de una pipeta plástica desechable de 3 mililitros de capacidad.

Se colocaron cubriendo un tercio de la capacidad de los porta muestras plásticos del equipo medidor de actividad de agua AQUALAB modelo Pawkit, disponible en el Departamento de Nutrición y Calidad del Centro Experimental Santa Catalina INIAP.

El procedimiento experimental para la determinación de la actividad de agua está disponible en el Anexo G.

2.5.7 Tiempo de equilibrio. La superficie del sobrenadante de la solución saturada y la superficie de la muestra debe tener una relación de 10:1. El volumen de la muestra con relación al recipiente o cámara que lo contiene debe ser de 1:20. Estas relaciones influyen en el tiempo de equilibrio. Ver cálculo en Anexo H.

Si la cantidad de la muestra comienza a acercarse al volumen total de aire, la presión de vapor de agua en el espacio no puede ser mantenido adecuadamente por la evaporación de la superficie de la solución salina saturada

El tiempo requerido para alcanzar el equilibrio en una muestra frente a una actividad de agua moderada puede ser de 3 a 5 días⁸⁹.

2.5.8 Determinación de la humedad relativa de equilibrio. Se registró la masa de cada vial tarado (m_1), y se pesaron muestras de 2 gramos (m_2), seis para cada frasco. En total se obtuvieron 35 muestras para el carbonato de potasio y 35 muestras de carbonato de sodio.

Por medio de pinzas metálicas los viales con las muestras fueron introducidos inmediatamente en los recipientes, los cuales fueron cerrados herméticamente.

Se ubicaron los recipientes en el interior del baño térmico, expuestos durante siete días a temperatura de $15 \pm 0,1^\circ\text{C}$.

Se pesó cada vial en intervalos de tres días para registrar el cambio de masa; para lo cual se extrajo cada vial del recipiente y se llevó al desecador para que se estabilice a la temperatura ambiental. Luego, se midió la masa de cada uno (m_3).

El procedimiento descrito anteriormente se repitió para las temperaturas de 25°C y 35°C .

El procedimiento experimental se observa en el Anexo J.

El cálculo de la humedad de equilibrio se realizó de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 & Humedad_{equilibrio} \\
 &= \frac{masa\ vial\ con\ muestra\ final - masa\ vial - masa\ muestra\ seca\ inicial}{masa\ muestra\ seca\ inicial} * 100 \quad (14)
 \end{aligned}$$

Cuyas unidades se expresan asi:

$$Humedad_{equilibrio} = \frac{gramos\ agua}{100\ gramos\ sustancia\ seca} \quad (15)$$

De acuerdo con los datos obtenidos en la experimentación se tiene que:

$$Humedad_{equilibrio} = \frac{g\ H_2O}{100\ g\ solido\ seco} = \frac{(m_3 - m_1 - m_2)}{m_2} * 100 \quad (16)$$

Donde:

m_1 = masa vial tarado, g

m_2 = masa muestra inicial, g

m_3 = masa vial con muestra final en equilibrio, g

X^* = Contenido de humedad en equilibrio (% en base seca).

2.6 Datos Experimentales

2.6.1. Simbología y Codificación de Variables

Tabla 11. Simbología y Codificación de Variables

NOMBRE	SÍMBOLO	UNIDAD
Actividad de agua	aw	-
Coeficiente de regresión	R^2	-
Constante cinética modelo de BET	C	
Constantes de D'Arcy and Watt	k; k'; L; L'	-
Constantes de Pele	$K_1; K_2; n_1; n_2$	-
Error relativo medio	%ERM	%
Constante Ley de Henry	K	mol/l.atm
Humedad	H	%
Humedad de equilibrio	H_{eq}	g agua /100 g s.s
Humedad relativa	HR	%
Contenido de humedad de la monocapa	m	g agua /100 g s.s
Masa vial tarado	m_1	g
Masa muestra seca	m_2	g
Masa vial con muestra final en equilibrio	m_3	g
Masa inicial previa al secado	Mi	g
Masa final después del secado	Mf	g
Modelo de Brunauer-Emmett-Teller	BET	-
Modelo Anderson, de Boer y Guggenheim	GAB	-
Modelo de D'Arcy and Watt	GDW	-
Presión	P	Atm
Presión parcial de vapor de agua	p	Atm
Presión de vapor del agua pura	p_0	Atm
Sólido seco	s.s	-
Solubilidad del gas (soluto) en el líquido	$X_{(aq)}$	mol gas/ l solución
Temperatura	T	°C

2.6.2 Datos de la determinación del contenido de humedad inicial del carbonato de sodio y carbonato de potasio por método gravimétrico. A continuación se presentan los datos obtenidos para el carbonato de sodio y carbonato de potasio.

Tabla 12. Datos para la determinación de humedad inicial en el carbonato de sodio

N°	Mi, g	Mf, g
1	5,0025	4,7923
2	5,0077	4,7971
3	5,0029	4,7877
4	5,0048	4,7944
5	5,0032	4,7872

Tabla 13. Datos para la determinación de humedad inicial en el carbonato de potasio

N°	Mi, g	Mf, g
1	5,0183	4,9851
2	5,0043	4,9726
3	5,0032	4,9709
4	5,0006	4,9676
5	5,0027	4,9706

2.6.3 Datos de la determinación del contenido de humedad inicial del carbonato de sodio y carbonato de potasio por medio de un analizador. Se utilizó una balanza de calentamiento infrarrojo para la determinación de la humedad inicial. A continuación se presentan los datos obtenidos para el carbonato de sodio y carbonato de potasio.

Tabla 14. Datos para la determinación de humedad inicial del carbonato de sodio por balanza de calentamiento infrarrojo

N°	Mi, g	Mf, g
1	5,000	4,783
2	5,001	4,787
3	5,010	4,790
4	5,001	4,788
5	5,003	4,783

Tabla 15. Datos para la determinación de humedad inicial del carbonato de potasio por balanza de calentamiento infrarrojo

N°	Mi, g	Mf, g
1	5,002	4,970
2	5,000	4,970
3	5,000	4,969
4	5,001	4,969
5	5,010	4,979

2.6.4 Secado de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio. Se secaron las muestras en el tiempo suficiente para no mostrar variación en su masa. A continuación se muestran los resultados obtenidos para esta operación:

Tabla 16. Secado de la muestra de carbonato de sodio y carbonato de potasio a 105°C

<i>Sustancia</i>	<i>Tiempo (horas)</i>	<i>Temperatura °C</i>	<i>Masa inicial (g)</i>	<i>Pérdida de masa (g)</i>
<i>Carbonato de sodio</i>	0	105	200	0
	2		191,53	8,47
	4		191,52	0,01
	6		191,52	0,00
	8		191,52	0,00
<i>Carbonato de potasio</i>	0		200	0
	2		198,85	1,15
	4		198,76	0,1
	6		198,71	0,05
	8		198,71	0,00
	10		198,71	0,00

2.6.5 Actividad de agua de las soluciones salinas saturadas preparadas

Tabla 17. Actividad de agua de soluciones salinas saturadas preparadas a 25°C

Sal	a_w
Hidróxido de sodio NaOH	0,04 ± 0,01
Cloruro de Litio LiCl	0,10 ± 0,01
Carbonato de potasio K ₂ CO ₃	0,44 ± 0,01
Yoduro de potasio KI	0,70 ± 0,01
Cloruro de sodio NaCl	0,75 ± 0,01
Cloruro de potasio KCl	0,85 ± 0,01
Cloruro de bario BaCl ₂	0,89 ± 0,01

2.6.6 Datos experimentales para el cálculo de la humedad de equilibrio

A continuación se muestran los datos empíricos obtenidos, masas de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio, al inicio y final de la experimentación, en contacto con las siete actividades de agua a las temperaturas de 15°C, 25°C y 35°C.

Tabla 18. Datos experimentales registrados para el carbonato de sodio a 15°C

Actividad de agua a_w	N° de repetición	Masa vial tarado m_1 , g	Masa muestra inicial m_2 , g	Masa vial + muestra inicial, g	Masa vial+muestra en equilibrio m_3 , g
0,04	1	9,7596	2,0085	11,7681	11,7685
	2	9,9126	2,0453	11,9579	11,9583
	3	9,966	2,0085	11,9745	11,9749
	4	9,8782	2,0265	11,9047	11,9051
	5	10,0292	2,0508	12,08	12,0804
0,1	1	9,8808	2,1385	12,0193	12,0206
	2	10,0062	2,0073	12,0135	12,0148
	3	10,0197	2,0032	12,0229	12,0243
	4	9,8317	2,0748	11,9065	11,9078
	5	9,9442	2,0134	11,9576	11,9588
0,44	1	9,9548	2,0602	12,015	12,0427
	2	10,0266	2,1131	12,1397	12,1647
	3	9,9921	2,0095	12,0016	12,0247
	4	10,0238	2,035	12,0588	12,0843
	5	10,1565	2,0268	12,1833	12,2103
0,7	1	9,8892	2,1414	12,0306	12,1795
	2	9,8454	2,0727	11,9181	12,0624
	3	9,7836	2,0528	11,8364	11,9734
	4	9,7912	2,1031	11,8943	12,0399
	5	10,0305	2,0981	12,1286	12,2739
0,75	1	10,1617	2,0772	12,2389	12,419
	2	10,0242	2,0436	12,0678	12,2515
	3	9,9789	2,1237	12,1026	12,2896
	4	10,0771	2,0758	12,1529	12,3367
	5	10,1205	2,0643	12,1848	12,3667
0,85	1	10,0057	2,0458	12,0515	12,3416
	2	10,0488	2,0912	12,14	12,4184
	3	10,0197	2,003	12,0227	12,2866
	4	9,9723	2,1453	12,1176	12,4108
	5	9,9953	2,0099	12,0052	12,2709
0,89	1	9,8419	2,0498	11,8917	12,2358
	2	9,9738	2,1409	12,1147	12,4676
	3	10,0385	2,0033	12,0418	12,3811
	4	10,1506	2,0686	12,2192	12,5105
	5	10,0254	2,0006	12,026	12,3598

Tabla 19. Datos experimentales registrados para el carbonato de sodio a 25°C

Actividad de agua aw	Nº de repetición	Masa vial tarado m ₁ , g	Masa muestra inicial m ₂ , g	Masa vial + muestra inicial g	Masa vial+muestra en equilibrio m ₃ , g
0,04	1	9,9081	2,2949	12,203	12,2037
	2	9,9953	2,0672	12,0625	12,0632
	3	10,0659	2,0564	12,1223	12,1229
	4	9,8904	2,0099	11,9003	11,9009
	5	10,0234	2,0004	12,0238	12,0244
0,1	1	9,9575	2,0194	11,9769	11,9791
	2	10,0243	2,0188	12,0431	12,045
	3	9,8894	2,0588	11,9482	11,9502
	4	10,0698	2,0039	12,0737	12,0759
	5	9,9874	2,0016	11,989	11,9911
0,44	1	9,9354	2,0073	11,9427	11,9989
	2	10,0894	2,05	12,1394	12,1979
	3	10,0062	2,0088	12,015	12,0712
	4	10,0247	2,0693	12,094	12,1506
	5	9,9876	2,0065	11,9941	12,0515
0,7	1	9,879	2,0326	11,9116	12,1445
	2	9,9968	2,0228	12,0196	12,2509
	3	10,0652	2,0084	12,0736	12,3024
	4	10,0195	2,0212	12,0407	12,2678
	5	10,0245	2,0078	12,0323	12,2602
0,75	1	10,1719	2,066	12,2379	12,5216
	2	9,9577	2,0408	11,9985	12,2687
	3	9,9567	2,0036	11,9603	12,2303
	4	10,1382	2,0341	12,1723	12,4458
	5	9,9875	2,0765	12,064	12,3365
0,85	1	10,0206	2,0477	12,0683	12,4544
	2	10,1585	2,0337	12,1922	12,5784
	3	10,0488	2,0076	12,0564	12,4318
	4	10,058	2,0048	12,0628	12,4418
	5	9,9645	2,0067	11,9712	12,3498
0,89	1	9,8915	2,1002	11,9917	12,4023
	2	9,9607	2,0496	12,0103	12,4752
	3	9,8805	2,1352	12,0157	12,4825
	4	9,9549	2,1086	12,0635	12,5371
	5	10,0234	2,0054	12,0288	12,4534

Tabla 20. Datos experimentales registrados para el carbonato de sodio a 35°C

Actividad de agua a_w	N° de repetición	Masa vial tarado m_1 , g	Masa muestra inicial m_2 , g	Masa vial + muestra inicial g	Masa vial+muestra en equilibrio m_3 , g
0,04	1	10,0333	2,0428	12,0761	12,0789
	2	10,1501	2,0833	12,2334	12,2362
	3	10,037	2,0075	12,0445	12,0472
	4	10,0771	2,0133	12,0904	12,0932
	5	10,16	2,021	12,181	12,1838
0,1	1	10,092	2,033	12,125	12,1356
	2	10,0393	2,0039	12,0432	12,0528
	3	9,8534	2,0096	11,863	11,8722
	4	10,5463	2,0151	12,5614	12,5716
	5	9,9654	2,0004	11,9658	11,9763
0,44	1	9,9474	2,1082	12,0556	12,1273
	2	10,162	2,0216	12,1836	12,2552
	3	10,0195	2,0006	12,0201	12,0919
	4	9,8473	2,0442	11,8915	11,9735
	5	10,0145	2,0034	12,0179	12,0882
0,7	1	10,15	2,0972	12,2472	12,5418
	2	9,9548	2,0077	11,9625	12,2455
	3	9,8803	2,0913	11,9716	12,2633
	4	9,9368	2,0069	11,9437	12,2252
	5	10,0197	2,0038	12,0235	12,3088
0,75	1	10,0195	2,0057	12,0252	12,392
	2	9,9134	2,0022	11,9156	12,2775
	3	9,9611	2,0492	12,0103	12,3788
	4	9,7595	2,064	11,8235	12,1941
	5	10,5463	2,0034	12,5497	12,9087
0,85	1	10,0372	2,0296	12,0668	12,536
	2	9,8892	2,0416	11,9308	12,4108
	3	10,0386	2,0068	12,0454	12,5265
	4	10,0308	2,0236	12,0544	12,5293
	5	10,092	2,0006	12,0926	12,6002
0,89	1	10,0279	2,1111	12,139	12,6986
	2	9,9813	2,0801	12,0614	12,5945
	3	10,0288	2,0067	12,0355	12,5876
	4	9,8473	2,0553	11,9026	12,4589
	5	9,9465	2,0003	11,9468	12,483

Tabla 21. Datos experimentales registrados para el carbonato de potasio a 15°C

Actividad de agua aw	Nº de repetición	Masa vial tarado m ₁ , g	Masa muestra inicial m ₂ , g	Masa vial + muestra inicial g	Masa vial+muestra en equilibrio m ₃ , g
0,04	1	9,8339	2,1153	11,9492	11,9646
	2	9,961	2,0354	11,9964	12,0115
	3	9,9123	2,0776	11,9899	12,0056
	4	9,9044	2,2943	12,1987	12,2147
	5	10,0045	2,0653	12,0698	12,0853
0,1	1	9,7839	2,0979	11,8818	11,9179
	2	10,1516	2,002	12,1536	12,1882
	3	9,9578	2,038	11,9958	12,0319
	4	10,4841	2,0051	12,4892	12,528
	5	10,0054	2,0543	12,0597	12,0821
0,44	1	9,8895	2,0873	11,9768	12,1615
	2	10,0411	2,1651	12,2062	12,3918
	3	10,1229	2,0571	12,18	12,3629
	4	10,1363	2,0813	12,2176	12,4024
	5	10,0045	2,002	12,0065	12,1815
0,7	1	9,9346	2,0366	11,9712	12,331
	2	10,1599	2,0572	12,2171	12,577
	3	9,9601	2,0843	12,0444	12,4055
	4	9,9508	2,0525	12,0033	12,3682
	5	10,4589	2,0134	12,4723	12,8243
0,75	1	9,8829	2,1255	12,0084	12,4551
	2	9,9572	2,1271	12,0843	12,5367
	3	9,8078	2,3119	12,1197	12,5755
	4	10,0412	2,0409	12,0821	12,5272
	5	10,0032	2,0211	12,0243	12,4545
0,85	1	9,9437	2,1757	12,1194	12,7024
	2	9,861	2,0047	11,8657	12,4109
	3	10,0287	2,0792	12,1079	12,6602
	4	9,988	2,1516	12,1396	12,7041
	5	10,156	2,0287	12,1847	12,7408
0,89	1	9,7974	2,0337	11,8311	12,4698
	2	9,8528	2,1484	12,0012	12,6527
	3	9,8686	2,0304	11,899	12,5307
	4	10,1329	2,1072	12,2401	12,7997
	5	10,0389	2,0008	12,0397	12,6616

Tabla 22. Datos experimentales registrados para el carbonato de potasio a 25°C

Actividad de agua aw	N° de repetición	Masa vial tarado m ₁ , g	Masa muestra inicial m ₂ , g	Masa vial + muestra inicial g	Masa vial+muestra en equilibrio m ₃ , g
0,04	1	10,0196	2,0107	12,0303	12,0553
	2	9,9408	2,0699	12,0107	12,0348
	3	9,8891	2,0797	11,9688	11,994
	4	9,9968	2,0048	12,0016	12,0256
	5	10,0234	2,0054	12,0288	12,0536
0,1	1	9,9479	2,1336	12,0815	12,1266
	2	10,0767	2,0331	12,1098	12,1529
	3	10,0198	2,1538	12,1736	12,2186
	4	10,0312	2,0258	12,057	12,1004
	5	10,0043	2,0045	12,0088	12,0505
0,44	1	9,9656	2,0205	11,9861	12,28
	2	10,0761	2,0615	12,1376	12,4373
	3	9,9843	2,0074	11,9917	12,2743
	4	10,1027	2,0686	12,1713	12,4582
	5	10,5632	2,0007	12,5639	12,8527
0,7	1	9,8908	2,0379	11,9287	12,663
	2	9,966	2,0108	11,9768	12,7065
	3	9,996	2,005	12,001	12,737
	4	9,918	2,0039	11,9219	12,6541
	5	10,0265	2,0212	12,0477	12,7791
0,75	1	10,1503	2,0292	12,1795	13,043
	2	10,039	2,0128	12,0518	12,9246
	3	9,8601	2,0477	11,9078	12,7712
	4	9,8135	2,1727	11,9862	12,8627
	5	10,0256	2,0034	12,029	12,8699
0,85	1	9,8613	2,0393	11,9006	13,0419
	2	10,0201	2,068	12,0881	13,2806
	3	9,9637	2,0245	11,9882	13,139
	4	10,0962	2,0898	12,186	13,3397
	5	10,0032	2,0005	12,0037	13,1243
0,89	1	10,1746	2,0589	12,2335	13,5007
	2	10,0014	2,01	12,0114	13,2483
	3	9,9134	2,0478	11,9612	13,2132
	4	10,1361	2,1085	12,2446	13,5374
	5	10,0056	2,0076	12,0132	13,2565

Tabla 23. Datos experimentales registrados para el carbonato de potasio a 35°C

Actividad de agua a_w	N° de repetición	Masa vial tarado m_1 , g	Masa muestra inicial m_2 , g	Masa vial + muestra inicial g	Masa vial+muestra en equilibrio m_3 , g
0,04	1	10,1505	2,0459	12,1964	12,2218
	2	10,0239	2,0728	12,0967	12,1233
	3	9,9878	2,0337	12,0215	12,0465
	4	10,1362	2,0646	12,2008	12,2263
	5	10,0324	2,0067	12,0391	12,0647
0,1	1	10,187	2,0058	12,1928	12,2451
	2	9,9373	2,0377	11,975	12,0439
	3	9,9183	2,0295	11,9478	12,0202
	4	10,1567	2,0507	12,2074	12,281
	5	10,0225	2,0656	12,0881	12,1454
0,44	1	9,9178	2,0241	11,9419	12,3465
	2	9,9657	2,0185	11,9842	12,3895
	3	10,0246	2,0381	12,0627	12,4843
	4	9,8905	2,037	11,9275	12,3421
	5	10,0045	2,0043	12,0088	12,4017
0,7	1	9,8898	2,0399	11,9297	12,8609
	2	10,0993	2,0134	12,1127	13,0223
	3	9,9442	2,1022	12,0464	13,0486
	4	9,9741	2,0197	11,9938	12,9814
	5	10,0234	2,0045	12,0279	12,9432
0,75	1	10,0016	2,0171	12,0187	13,1056
	2	10,0776	2,0208	12,0984	13,1867
	3	10,0415	2,1153	12,1568	13,349
	4	9,9045	2,0167	11,9212	13,1077
	5	10,0234	2,0158	12,0392	13,1367
0,85	1	9,9923	2,1933	12,1856	13,7642
	2	10,1048	2,0252	12,13	13,5147
	3	9,883	2,0109	11,8939	13,3129
	4	9,9687	2,004	11,9727	13,3622
	5	10,0256	2,0235	12,0491	13,4356
0,89	1	10,1106	2,0862	12,1968	13,7726
	2	9,9348	2,0167	11,9515	13,4559
	3	10,0484	2,0233	12,0717	13,5772
	4	10,1605	2,0232	12,1837	13,7398
	5	10,0245	2,0043	12,0288	13,5603

2.6.7 Datos para análisis de formación de bicarbonatos en carbonatos por acción del dióxido carbono del aire

Tabla 24. Constantes de Henry (K) para CO₂

Temperatura, °C	K, mol _{CO₂} L _{agua} ⁻¹ atm ⁻¹
15	4,52*10 ⁻²
25	3,38*10 ⁻²
35	2,66*10 ⁻²

Fuente: ROMO, Luis. "Tratado de Fisicoquímica" Tomo I. p. 257

Tabla 25. Propiedades del agua líquida a diferentes temperaturas

Propiedad	15°C	25°C	35°C
Densidad, g/L	999,099	997,045	994,032
Presión de vapor, atm	0,0168	0,0313	0,0555

Fuente: PERRY, John. "Manual del ingeniero químico" Tomo II. Mc Graw Hill. p.3-57; 3-95

Tabla 26. Propiedades del aire

Propiedad	Valor
Presión atmosférica Quito, atm*	0,7172
Fracción volumétrica CO ₂ en el aire**	0,0003

Fuente: *DPEC, promedio de mediciones efectuadas el día 07/10/2011

**FELDER, R. ROUSSEAU, R. Principios básicos de los procesos químicos. El Manual Moderno. p. 137

3. CALCULOS Y RESULTADOS

3.1. Isotermas de sorción de humedad

3.1.1 Contenido de humedad inicial de muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio

Se determinó por el método gravimétrico y por medio de un analizador (balanza de calentamiento infrarrojo).

$$\%H = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (17)$$

A partir de las tablas 12 a la 15, se obtuvieron los datos para el cálculo del contenido de humedad inicial por los métodos anteriormente mencionados.

3.1.1.1 Cálculo modelo para el carbonato de sodio por el método gravimétrico

$$\%H = \frac{(5,0025 - 4,7923)g}{5,0025 g} * 100 = 4,2019\%$$

Donde:

M_i=Masa inicial de la muestra, 5,0025 g.

M_f=Masa final de la muestra, 4,7923 g

3.1.1.2 Cálculo modelo para el carbonato de sodio en analizador

$$\%H = \frac{(5,000 - 4,783)g}{5,000 g} * 100 = 4,34\%$$

Donde:

M_i=Masa inicial de la muestra, 5,000 g.

M_f=Masa final de la muestra, 4,783 g.

Se calculó el valor promedio de los resultados obtenidos para las cinco determinaciones, en los dos métodos (Ver tabla 27 y 28).

Tabla 27. Resultados obtenidos para el cálculo de la humedad inicial en las muestras de carbonato de sodio

<i>N° de repeticiones</i>	<i>MÉTODO</i>	
	<i>Secado en estufa</i>	<i>Analizador Balanza Calentamiento infrarrojo</i>
1	4,2019	4,34
2	4,2055	4,28
3	4,3015	4,39
4	4,2040	4,26
5	4,3172	4,40
Promedio	4,2460	4,33

Tabla 28. Resultados obtenidos para el cálculo de la humedad inicial en las muestras de carbonato de potasio

<i>N° de repeticiones</i>	<i>MÉTODO</i>	
	<i>Secado en estufa</i>	<i>Analizador Balanza Calentamiento infrarrojo</i>
1	0,6616	0,63
2	0,6335	0,60
3	0,6456	0,62
4	0,6599	0,63
5	0,6417	0,61
Promedio	0,6485	0,62

Las humedades iniciales promedio determinadas por el método gravimétrico y de la balanza de calentamiento infrarrojo, para el Carbonato de sodio están entre los valores de 4,2460% y 4,33%.respectivamente; para el caso del Carbonato de sodio los resultados son de 0,6485% y 0,62%.

Estos datos varían considerablemente de las especificaciones técnicas respecto al contenido de humedad o LOD (Loss on drying-Pérdida en secado) disponibles para cada sustancia en los Anexos B y C, en el caso del carbonato de sodio debe ser menor o igual a 0,5%, en el carbonato de potasio esta variable va desde 0,306% a 0,5% como máximo.

El incremento del contenido de humedad observado puede atribuirse a la penetración de aire a través del embalaje, debido a las condiciones ambientales en el transporte del producto, la manipulación que pudo ocasionar fisuras en la envoltura del producto y las condiciones atmosféricas de almacenamiento en las respectivas empresas.

3.1.2 Cálculo del contenido de humedad final de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio. La tabla 16 muestra las masas de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio antes y después de someterse a secado.

3.1.2.1 Cálculo modelo para determinación de humedad final del carbonato de sodio

La determinación del porcentaje de humedad se calcula así:

$$\%H = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (18)$$

Donde :

M_i =masa de carbonato de sodio sometida a secado, 200 g

M_f =masa de carbonato de sodio luego de secarse (invariante): 191,52 g.

Entonces la humedad perdida por la sal durante el secado es:

$$\%H = \frac{(200 - 191,52)g}{200g} * 100 = 4,24\%$$

La humedad promedio del carbonato de sodio (secado en estufa) es de 4,2460%; y la humedad final del carbonato de sodio se calcula:

$$\%H_{final} = \%H_{perdida\ secado} - \%H_{inicial}$$

(19)

$$\%H_{final} = 4,2460\% - 4,24\% = 0,006\%$$

Aplicando el mismo procedimiento para el carbonato de potasio, el contenido de humedad final es de 0,004%. Por lo que podría asumirse un contenido de humedad inicial cero en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio.

3.1.3 Cálculo de la humedad de equilibrio del carbonato de sodio y carbonato de potasio.

Teniendo en cuenta la ecuación 14 se calculó la humedad de equilibrio de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio.

A partir de las tablas 18 a la 23, se obtuvieron los datos para el cálculo de la humedad de equilibrio de las sustancias.

3.1.3.1 Cálculo modelo para la determinación de la humedad de equilibrio del carbonato de sodio a 15°C y actividad de agua 0,04. Los datos experimentales se tomaron de la tabla 18.

De acuerdo con la ecuación 14 se tiene que:

$$Humedad_{equilibrio} = \frac{g \text{ H}_2\text{O}}{100 \text{ g solido seco}} = \frac{(m_3 - m_1 - m_2)}{m_2} * 100 \quad (20)$$

$$Humedad_{equilibrio} = \frac{(11,7685 - 9,7596 - 2,0085)}{2,0085} * 100 = 0,0199 \frac{g \text{ H}_2\text{O}}{100 \text{ g solido seco}}$$

Donde:

m_1 = masa vial tarado, 9,7596 g.

m_2 = masa muestra inicial, 2,0085g.

m_3 = masa vial con muestra final en equilibrio, 11,7685 g.

Los resultados de humedad de equilibrio obtenidos experimentalmente para las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio son representados en la Tabla 29, dichos valores constituyen la humedad de equilibrio promedio de las cinco determinaciones realizadas; expresada como (g agua/100 g s.s).

Los valores de humedad equilibrio para cada réplica realizada, están disponibles en el Anexo L y M.

Tabla 29. Humedad de equilibrio carbonato de sodio y carbonato de potasio a siete actividades de agua y temperaturas de 15, 25 y 30°C

T, °C	Actividad de agua, a_w	Humedad de equilibrio (g agua/100 g s.s)	
		Carbonato de sodio	Carbonato de potasio
15	0,04	0,0197	0,7347
	0,1	0,0635	1,6492
	0,44	1,2525	8,1366
	0,7	6,8875	17,5495
	0,75	8,8262	21,0189
	0,85	13,5110	26,8406
	0,89	16,1950	30,0964
25	0,44	0,0307	1,2106
	0,1	0,1030	2,1091
	0,44	2,8094	14,2932
	0,7	11,3743	36,3509
	0,75	13,4033	42,0791
	0,85	18,8622	56,3391
	0,89	21,5457	61,4934
35	0,44	0,1367	1,2530
	0,1	0,4979	3,1838
	0,44	3,6104	20,1421
	0,7	14,0712	46,6537
	0,75	18,0441	53,8829
	0,85	23,8886	68,5330
	0,89	26,7043	75,5727

El carbonato de sodio anhidro manifestó los menores valores de capacidad de sorción por el contrario el carbonato de potasio anhidro presentó la más alta capacidad de hidratación, esto se debe a que esta sustancia es deliquescente.

A medida que se incrementa la temperatura, la humedad de equilibrio de las dos sustancias aumenta.

3.1.4 Construcción de las isotermas de sorción de humedad para el carbonato de sodio y carbonato de potasio. Los gráficos 3 al 10 muestran las isotermas de sorción obtenidas en las dos sustancias, para siete actividades de agua y temperaturas de 15°C, 25°C y 35°C.

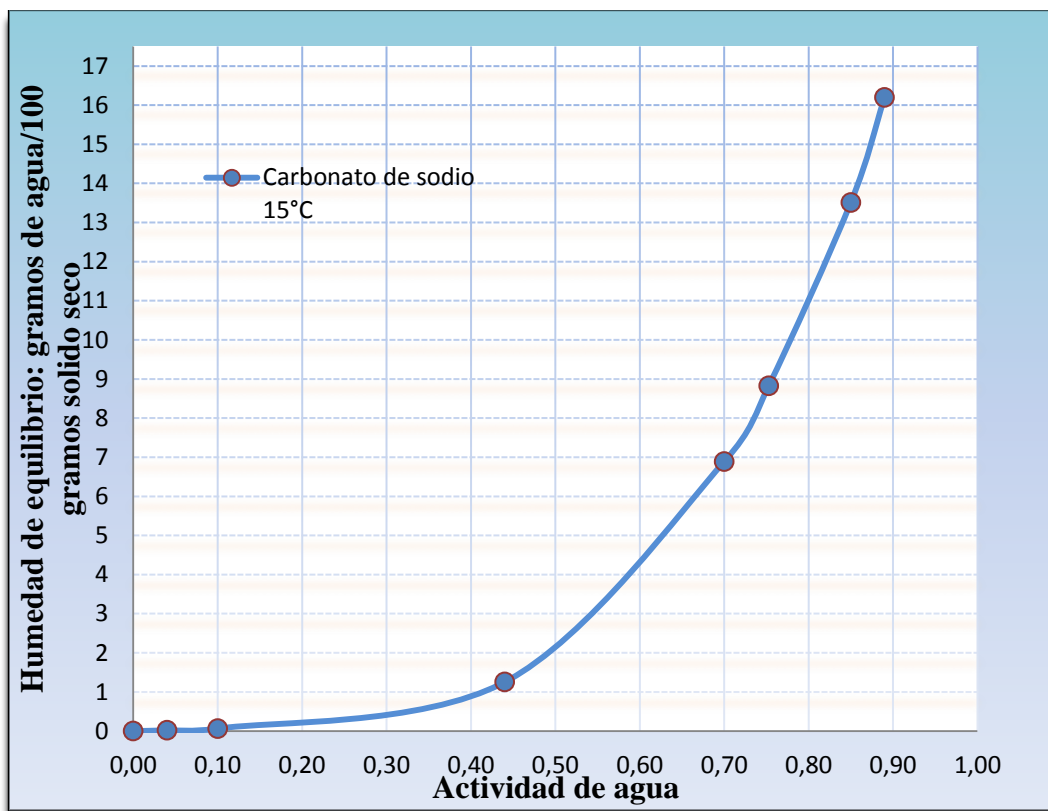


Gráfico 3. Isoterma de sorción de humedad de carbonato de sodio a 15°C

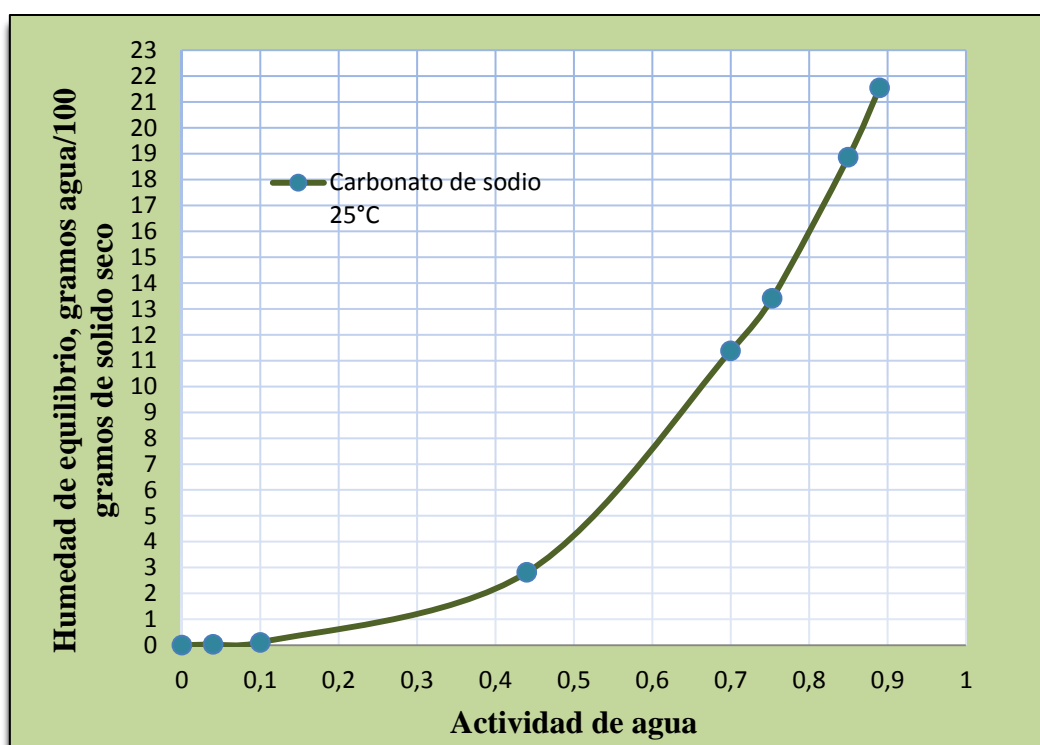


Gráfico 4 . Isoterma de sorción de humedad de carbonato de sodio a 25°C

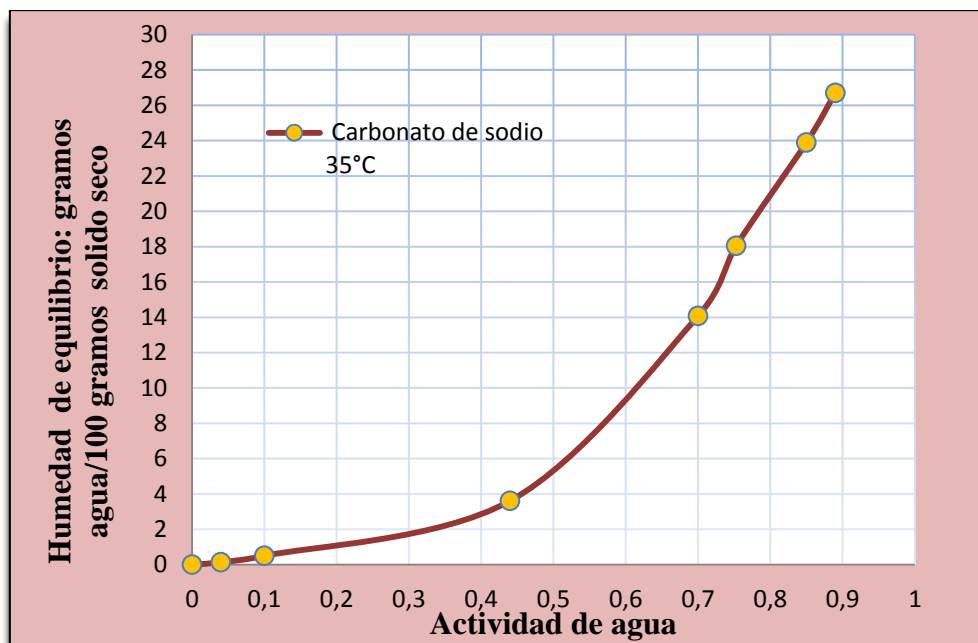


Gráfico 5. Isoterma de sorción de humedad de carbonato de sodio a 35°C

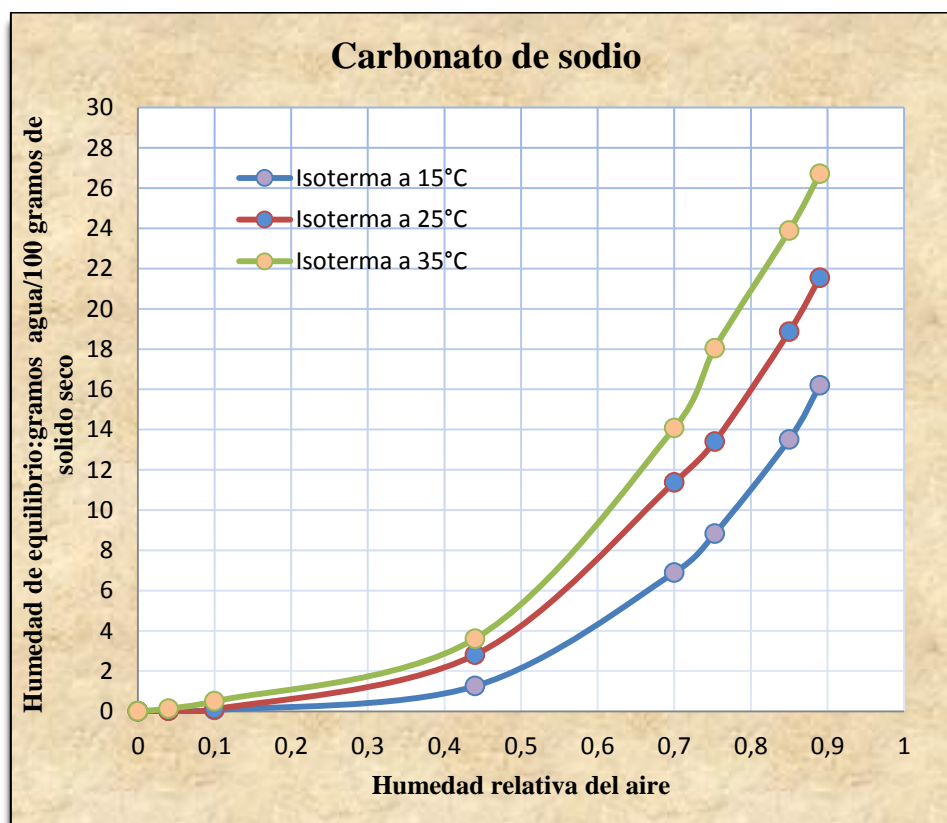


Gráfico 6. Isoterma de sorción de humedad de carbonato de sodio a varias temperaturas

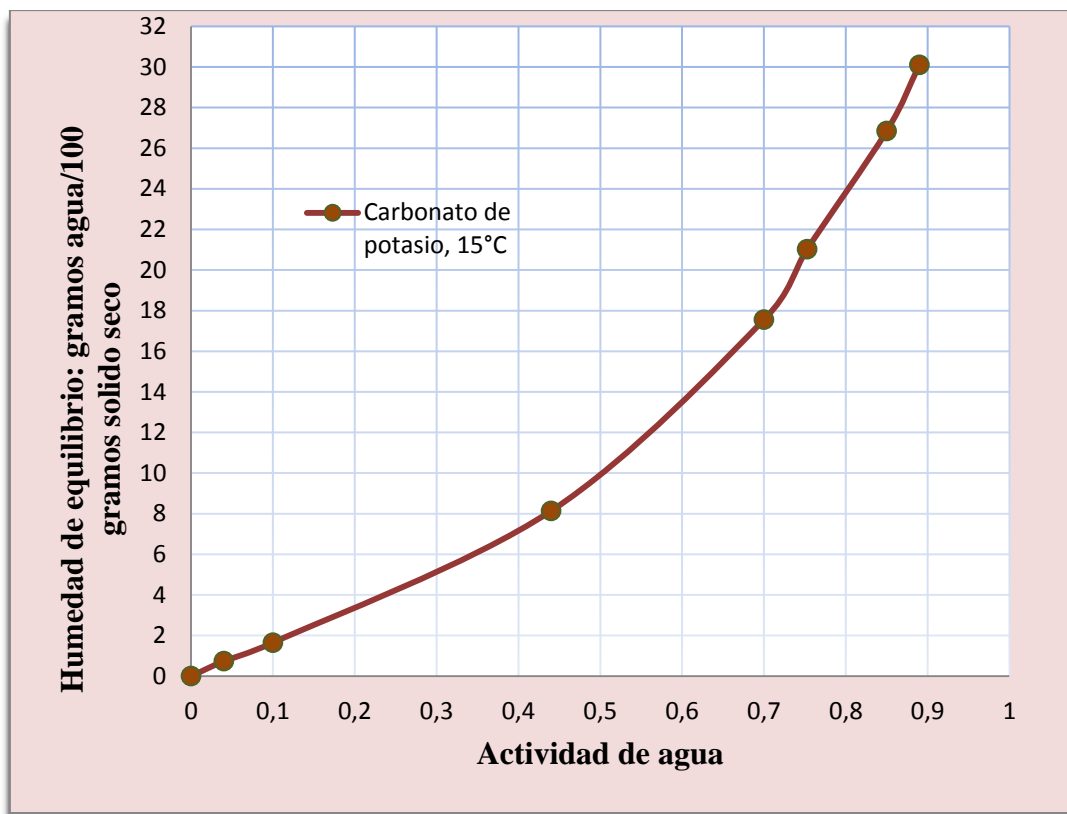


Gráfico 7. Isoterma de sorción de humedad de carbonato de potasio a 15°C

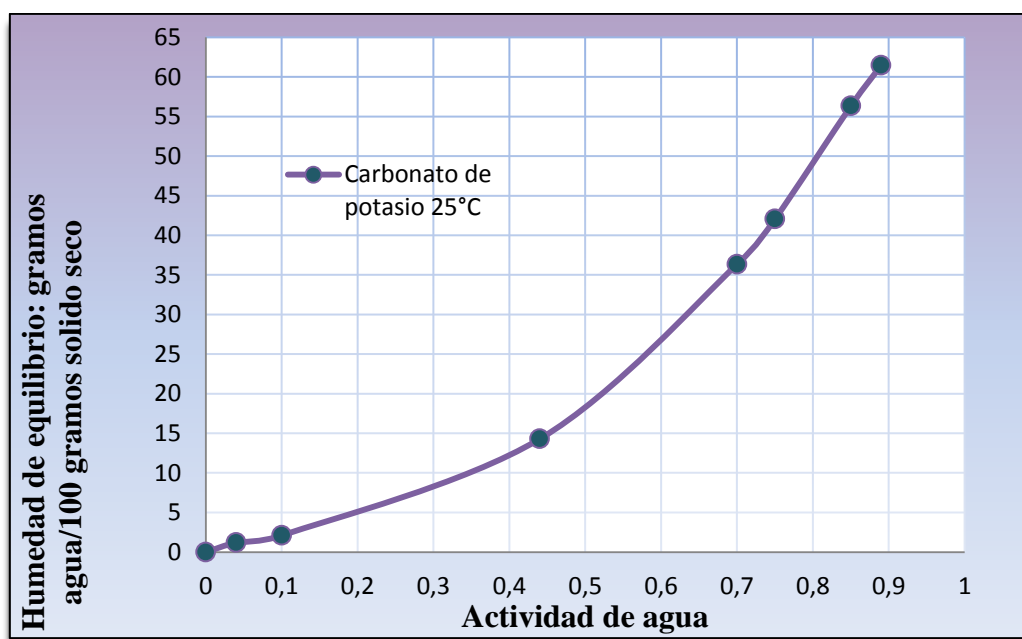


Gráfico 8. Isoterma de sorción de humedad de carbonato de potasio a 25°C

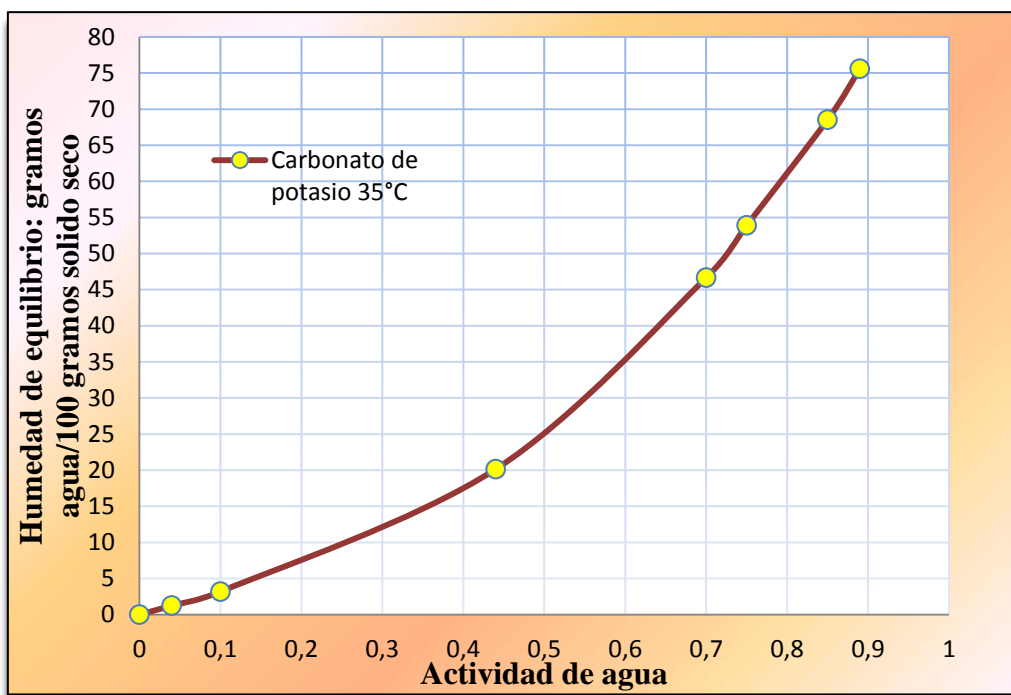


Gráfico 9. Isoterma de sorción de humedad de carbonato de potasio a 35°C

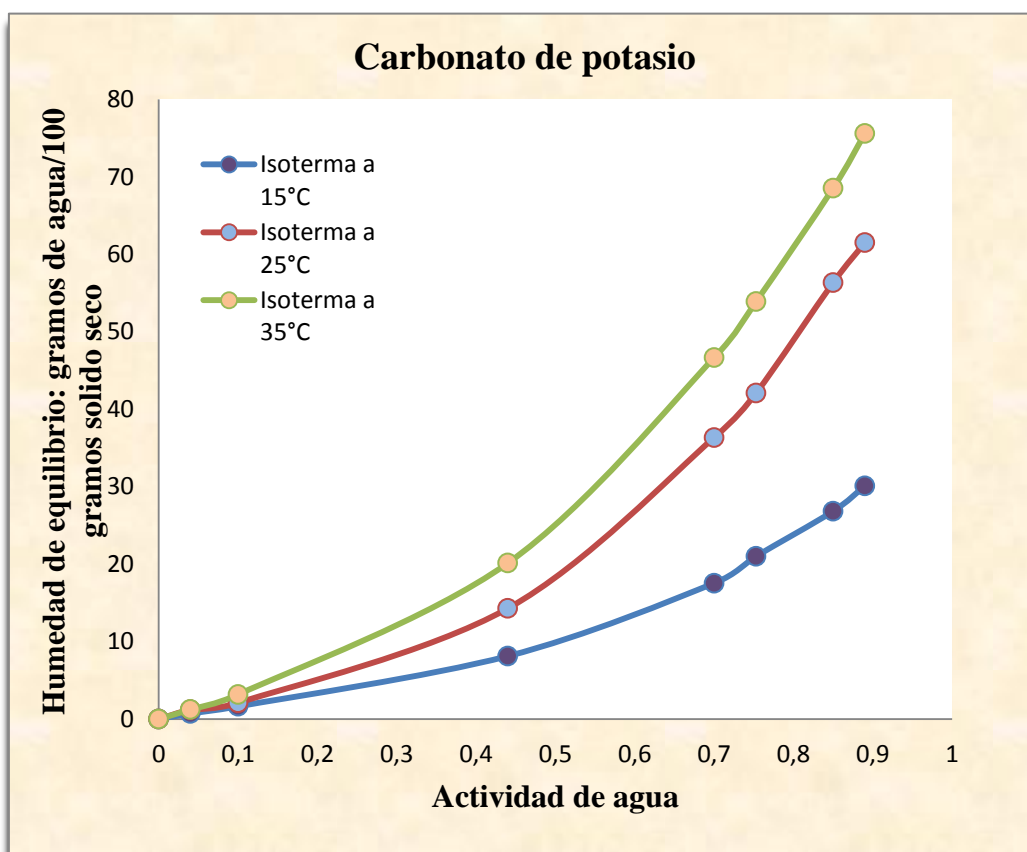


Gráfico 10. Isoterma de sorción de humedad de carbonato de potasio a varias temperaturas

Se puede deducir, a partir de las figuras presentadas anteriormente, tanto para el carbonato de sodio como para el carbonato de potasio, que las isotermas de sorción de humedad presentan una forma cóncava, características del tipo III, correspondientes a sustancias cristalinas puras, solubles en agua como las sales. (Rahman, 1995), (Bell & Labuza).

Además, las curvas presentan pendientes positivas y en sentido creciente con el incremento de la temperatura, esto se interpreta como una mayor capacidad de sorción de humedad por parte del carbonato de sodio y carbonato de potasio con el incremento de la actividad de agua o humedad relativa del aire de la cámara y la temperatura ambiental.

3.1.5 Modelación matemática de las isotermas de sorción de humedad

3.1.5.1 Parámetros de los modelos BET, GAB, PELEG y D'Arcy and Watt. Los modelos matemáticos se han utilizado entre otras cosas, para el estudio de isotermas, para la descripción de la naturaleza de enlace de agua en materiales higroscópicos.

Se escogieron los modelos de Brunauer-Emmett-Teller (BET), Anderson, de Boer y Guggenheim (GAB), PELEG y D'Arcy and Watt (GDW), por su relevancia en diversas determinaciones de isotermas de sorción de humedad tanto de una gran variedad de alimentos, como de sustancias higroscópicas de interés industrial.

Las ecuaciones de GAB y BET, son ampliamente utilizadas debido a que dan explicación termodinámica a sus constantes, como es el valor del contenido de humedad de la monocapa.

En el caso del modelo de PELEG, modelo matemático empírico de 4 parámetros, que ha sido aplicado con éxito a todo tipo de isotermas de sorción de humedad.

El modelo de D'Arcy and Watt, posee 5 parámetros, lo que permite ser más flexible respecto a los anteriores modelos. Las constantes que posee este modelo dependen de la naturaleza del producto y de la temperatura.

Los parámetros de ajuste, obtenidos a partir de los modelos matemáticos, fueron calculados utilizándose la herramienta de análisis iterativo SOLVER de la hoja de cálculo Microsoft Excel 2007.

3.1.5.2 Cálculo modelo para determinación de parámetros de los modelos matemáticos para ajuste de datos experimentales del carbonato de sodio a 15°C. A partir de los datos experimentales de humedad de equilibrio para el carbonato de sodio a 15°C, mostrados en la tabla 30, se tiene:

Tabla 30. Humedad de equilibrio experimental carbonato de sodio

Temperatura 15°C	Actividad de agua, a_w	Humedad de equilibrio (g agua/100 g s.s) Carbonato de sodio
	0,44	0,0197
	0,1	0,0635
	0,44	1,2525
	0,7	6,8875
	0,75	8,8262
	0,85	13,5110
	0,89	16,1950

Se van a obtener los parámetros del modelo de PELEG como cálculo tipo, por ser el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales, tal como se muestra en los análisis posteriores.

Para el cálculo de los parámetros del modelo matemático se realizó lo siguiente:

- En una hoja de cálculo de Excel (ver figura 30), se ingresaron los valores experimentales obtenidos y se colocaron en las celdas siguientes los posibles valores de los parámetros: K_1 , n_1 , K_2 y n_2 ; a partir de los cuales se realizaron los cálculos del valor de la humedad de equilibrio, utilizando el modelo de PELEG:

$$Heq = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2} \quad (21)$$

Donde:

Heq= Contenido de humedad en equilibrio

a_w = Actividad de Agua

K_1 ; K_2 ; n_1 ; n_2 = Constantes de Peleg

Restricciones: $n_1 > 1$; $n_2 < 1$

- Se estimó el error relativo medio:

$$ERM\% = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{Heq_{\text{experim.}} - Heq_{\text{calc.}}}{Heq_{\text{experim.}}} \right)^2}{N} * 100 \quad (22)$$

Donde:

N = Número de puntos experimentales

$Heq_{\text{experim.}}$ = Contenido de humedad de equilibrio experimental

$Heq_{\text{calc.}}$ = Contenido de humedad de equilibrio calculado

- Se realizó el cálculo del coeficiente de regresión por medio del Excel, para estimar el grado de concordancia entre los valores experimentales y calculados.
- Posteriormente se usa la herramienta SOLVER, como lo muestra la figura 30:

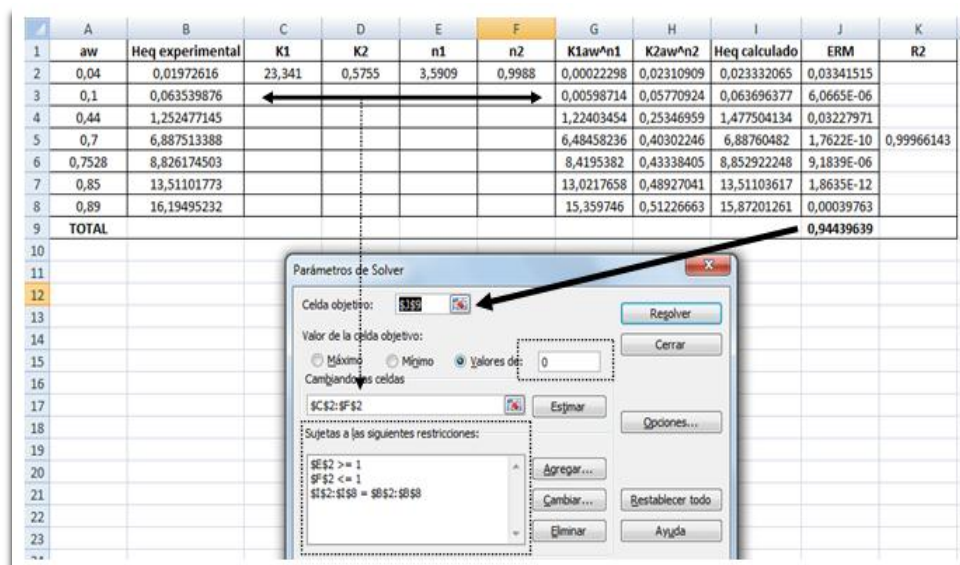


Figura 22: Uso de la herramienta SOLVER para estimar parámetros de modelos matemáticos

El valor de la celda objetivo corresponde al Error Relativo Medio calculado, el cual idealmente debe ser igual a cero. Las celdas que se sujetan a iteraciones sucesivas corresponden a los valores de los parámetros buscados. Las restricciones a ingresar corresponden a las que están inmersas en el modelo así como el valor de la humedad de equilibrio calculada es igual al valor de la humedad de equilibrio experimental.

Los parámetros de ajuste de los cuatro modelos matemáticos considerados, para cada experimentación se muestran a continuación:

Tabla 31. Parámetros de ajuste del modelo de BET para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	CONSTANTES			
		<i>M</i>	<i>C</i>	% <i>ERM</i>	<i>R</i> ²
<i>BET</i>	15	1,0000	1,0000	48,4316	0,9606
	25	1,1065	1,0000	38,7504	0,9208
	35	4,1663	1,0846	5,4546	0,9086

Tabla 32. Parámetros de ajuste del modelo de GAB para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	CONSTANTES				
		<i>M</i>	<i>C</i>	<i>K</i>	% <i>ERM</i>	<i>R</i> ²
<i>GAB</i>	15	1,0000	1,0000	1,0582	45,8107	0,8698
	25	1,0440	1,0000	1,0717	27,6720	0,7602
	35	4,7156	1,0000	0,9550	5,3856	0,9491

Tabla 33. Parámetros de ajuste del modelo de PELEG para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	CONSTANTES					
		<i>K₁</i>	<i>n₁</i>	<i>K₂</i>	<i>n₂</i>	% <i>ERM</i>	<i>R</i> ²
<i>PELEG</i>	15	23,3410	3,5909	0,5755	0,9988	0,9446	0,9997
	25	29,5673	2,9733	0,7154	0,9988	0,0583	0,9993
	35	34,3119	3,0128	3,3652	0,9688	1,5089	0,9978

Tabla 34. Parámetros de ajuste del modelo de D'Arcy and Watt para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	CONSTANTES						
		<i>L</i>	<i>K</i>	<i>C</i>	<i>k'</i>	<i>L'</i>	% <i>ERM</i>	<i>R</i> ²
<i>D'Arcy and Watt</i>	15	0,4708	-0,4737	11,2898	93,6968	49,7802	0,5892	0,9941
	25	0,4708	-0,2457	90,3883	814,4881	234,3842	1,1712	0,9918
	35	0,0879	-0,0277	15321,5381	804255,747	78809,444	1,8197	0,9959

Tabla 35. Parámetros de ajuste del modelo de BET para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	CONSTANTES			
		<i>M</i>	<i>C</i>	% <i>ERM</i>	<i>R</i> ²
<i>BET</i>	15	3,3751	6,3402	7,0034	0,9167
	25	9,0776	2,3796	5,3913	0,9082
	35	8,5390	4,5454	8,3927	0,8981

Tabla 36. Parámetros de ajuste del modelo de GAB para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	CONSTANTES				
		<i>M</i>	<i>C</i>	<i>K</i>	% <i>ERM</i>	<i>R</i> ²
<i>GAB</i>	15	12,4648	1,0000	0,7606	0,2682	0,9991
	25	23,9834	1,0000	0,8083	2,2660	0,9922
	35	20,0038	1,7887	0,8682	1,4413	0,9818

Tabla 37. Parámetros de ajuste del modelo de PELEG para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	CONSTANTES					
		K_1	n_1	K_2	n_2	%ERM	R^2
PELEG	15	27,6395	3,2730	12,2209	0,8737	0,0293	0,9997
	25	73,7019	2,3263	4,9313	0,4471	0,0086	0,9998
	35	66,9649	2,6869	29,8989	0,9898	0,0107	0,9999

Tabla 38. Parámetros de ajuste del modelo de D'Arcy and Watt para la predicción de sorción de humedad en el carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	CONSTANTES						
		L	K	C	k'	L'	%ERM	R^2
<i>D'Arcy and Watt</i>	15	0,5554	-0,4658	28,7499	239,4762	178,1294	0,2376	0,9993
	25	23,9834	-0,0146	43086,705	3522367,938	95433,1078	1,4946	0,9995
	35	0,6551	-0,6551	12,4193	9,8079	55,9549	5,0750	0,9982

En las tablas 35 a la 38 se presentan los parámetros estimados (m , C), para la ecuación de BET por y para las ecuaciones de GAB (m , C , K), PELEG (K_1 , K_2 , n_1 , n_2) y D'Arcy and Watt (L , k , C , k' , L'), obtenidos desde el ajuste de las isothermas de sorción de humedad de carbonato de sodio y carbonato de potasio a temperaturas de 15°C, 25°C y 35°C.

La calidad del ajuste de los modelos propuestos se evaluó por medio del coeficiente de regresión lineal (R^2), el que debe ser superior a 0,85 para conseguir un buen modelado de los datos experimentales y el porcentaje del error relativo medio (%ERM), parámetro estadístico ampliamente utilizado en isothermas de sorción.

Analizando los datos contenidos en las tablas se observa que, la ecuación propuesta por BET presenta valores de R^2 en un rango de 0,9606 a 0,8981 y valores de error relativo medio de 5,3913% a 48,4316%, por ende presenta un ajuste de datos experimentales insatisfactorio.

El modelo de GAB muestra resultados similares al modelo de BET, presentando valores de R^2 que van desde 0,9991 a 0,7602 y un rango de error relativo medio de 0,2682% a 45,8107%, dependiendo de la sustancia y la temperatura. Los valores de R^2 y del error relativo medio muestran que este modelo no es adecuado para el ajuste de los datos experimentales obtenidos.

El modelo propuesto por PELEG determina valores de R^2 que están entre 0,9978 y 0,9999, y resultados de error relativo medio de 0,0086 % a 1,5089 %, dependiendo de la temperatura y el tipo de muestra.

La ecuación de D'Arcy and Watt, presenta valores de R^2 comprendidos en el rango de 0,9917 a 0,9995 y valores de error relativo medio de 0,2376% a 5,0750%.

La ecuación propuesta por PELEG presenta los valores más altos del coeficiente de regresión lineal R^2 y los valores más bajos de error relativo medio, para todas las temperaturas estudiadas; siendo por lo tanto, el modelo de mejor ajuste de datos experimentales para el carbonato de sodio y el carbonato de potasio, siendo el más idóneo para la predicción de nuevos valores. La ventaja del uso del modelo de PELEG se confirma en varios trabajos de investigación.

El parámetro m conocido como valor de monocapa, el cual representa niveles muy bajos de contenido de humedad (a_w : hasta ~ 0.2), y considera que la molécula de agua se encuentra fuertemente unida sobre una superficie homogénea, dado por el modelo BET y el modelo de GAB.

Para el carbonato de potasio este parámetro aumenta con la temperatura de 15°C a 25°C y se reduce ligeramente a 35°C. En el carbonato de sodio el valor de m aumenta con la temperatura. Estos resultados pueden deberse a que la sal interacciona con el agua y se experimenta un incremento de la solubilidad de las moléculas de la monocapa en el sentido de las temperaturas crecientes.

La constante C del modelo de BET para el carbonato de potasio no presenta valores que sigan una tendencia definida, mientras para el carbonato de sodio muestra resultados iguales y muy cercanos a la unidad.

La constante C del modelo de GAB tanto para el carbonato de potasio como para el carbonato de sodio presenta valores iguales y ligeramente superiores a la unidad.

La constante K del modelo de GAB no muestra valores que sigan una tendencia definida en los resultados obtenidos para el carbonato de potasio y el carbonato de sodio.

Los parámetros del modelo de PELEG cumplen con las restricciones para el ajuste de datos experimentales, tal como el parámetro n_1 en las dos sustancias posee valores mayores a la unidad y n_2 tiene valores menores a la unidad.

Estas sustancias son más higroscópicas al incrementarse la temperatura, debido a que la solubilidad de estas sales aumenta con la temperatura.

3.1.6 Ajuste de los datos experimentales con los modelos matemáticos de BET, GAB, PELEG y GDW. A partir de los parámetros obtenidos para cada modelo matemático, se calculó el valor de humedad de equilibrio correspondiente.

3.1.6.1 Cálculo modelo para determinación de humedades de equilibrio por los modelos matemáticos de BET, GAB, PELEG y GDW, para el carbonato de sodio a 15°C. Tomando los resultados de las tablas 31 a la 38, se obtuvo lo siguiente:

Tabla 39. Cálculo humedades de equilibrio por modelos matemáticos para el carbonato de sodio a 15°C

Humedad de equilibrio calculada			
BET	GAB	PELEG	GDW
$\frac{mCa_w}{(1-a_w)[1+(C-1)*a_w](1-Ka_w)(1-Ka_w+CKa_w)}$	$\frac{mCKa_w}{(1-Ka_w)(1-Ka_w+CKa_w)}$	$K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2}$	$\frac{k k'(a_w)}{1+k(a_w)} + C(a_w) + \frac{LL'(a_w)}{1-L(a_w)}$
m=1 C=1	m=1 C=1 K=1,0582	K ₁ =23,3410 n ₁ =3,5909 K ₂ =0,5755 n ₂ =0,9988	L=0,4708 k=-0,4737 C= 11,2898 K'=93,6968 L'=49,7802
0,0417	0,0442	0,0233	0,0197
0,01111	0,1183	0,0637	0,0635
0,7857	0,8714	1,4775	1,2525
2,3333	2,8577	6,8876	5,8011
3,0453	3,9177	8,8529	7,7366
5,6667	8,9516	13,5110	13,0583
8,0909	16,1950	15,8720	16,1950

3.1.6.2 Modelo de PELEG ajustado para la predicción de la humedad de equilibrio del carbonato de sodio y carbonato de potasio. A continuación se presenta los resultados obtenidos para el modelo de PELEG, el cual posee mayor calidad de ajuste en los datos experimentales.

Tabla 40. Resultados Modelo de PELEG ajustado para la predicción de la humedad de equilibrio del carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	$X^* = K_1 a_w^{n1} + K_2 a_w^{n2}$
PELEG	15	$X^* = 23,3410 a_w^{3,5909} + 0,5755 a_w^{0,9988}$
	25	$X^* = 29,5673 a_w^{2,9733} + 0,7154 a_w^{0,9988}$
	35	$X^* = 34,3119 a_w^{3,0128} + 3,3652 a_w^{0,9688}$

Tabla 41. Resultados Modelo de PELEG ajustado para la predicción de la humedad de equilibrio del carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C

MODELO	T, °C	$X^* = K_1 a_w^{n1} + K_2 a_w^{n2}$
PELEG	15	$X^* = 27,6395 a_w^{3,2730} + 12,2209 a_w^{0,8737}$
	25	$X^* = 73,7019 a_w^{2,3263} + 4,9313 a_w^{0,4471}$
	35	$X^* = 66,9649 a_w^{2,6869} + 29,8989 a_w^{0,9898}$

En la siguiente tabla se presentan las humedades de equilibrio, calculadas a partir de las constantes de PELEG, por tratarse del mejor ajuste. Los cálculos con el resto de modelos se muestran en los Anexos N al Q.

Tabla 42. Resultados Humedades de equilibrio calculadas con el modelo de PELEG para el carbonato de sodio y carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C

Temperatura (°C)	aw	SORCIÓN	
		<i>Humedad de equilibrio*</i>	
		Carbonato de sodio	Carbonato de potasio
15	0,04	0,0233	0,7347
	0,1	0,0637	1,6492
	0,44	1,4776	7,8462
	0,7	6,8877	17,5495
	0,75	8,8530	20,4477
	0,85	13,5111	26,8406
	0,89	15,8721	29,9127
25	0,04	0,0308	1,2106
	0,1	0,1032	2,1091
	0,44	2,8896	14,3319
	0,7	10,7396	36,3509
	0,75	13,2487	42,0791
	0,85	18,8452	55,0853
	0,89	21,5458	60,8822
35	0,04	0,1510	1,2478
	0,1	0,3949	3,1989
	0,44	4,4115	20,6431
	0,7	14,0976	46,6888
	0,75	17,1410	53,4042
	0,85	23,9031	68,7282
	0,89	27,1588	75,6044

3.1.7 Ajuste gráfico de los datos experimentales con los modelos matemáticos de BET, GAB, PELEG y GDW. El ajuste de los datos experimentales a los cuatro modelos matemáticos se muestra a continuación:

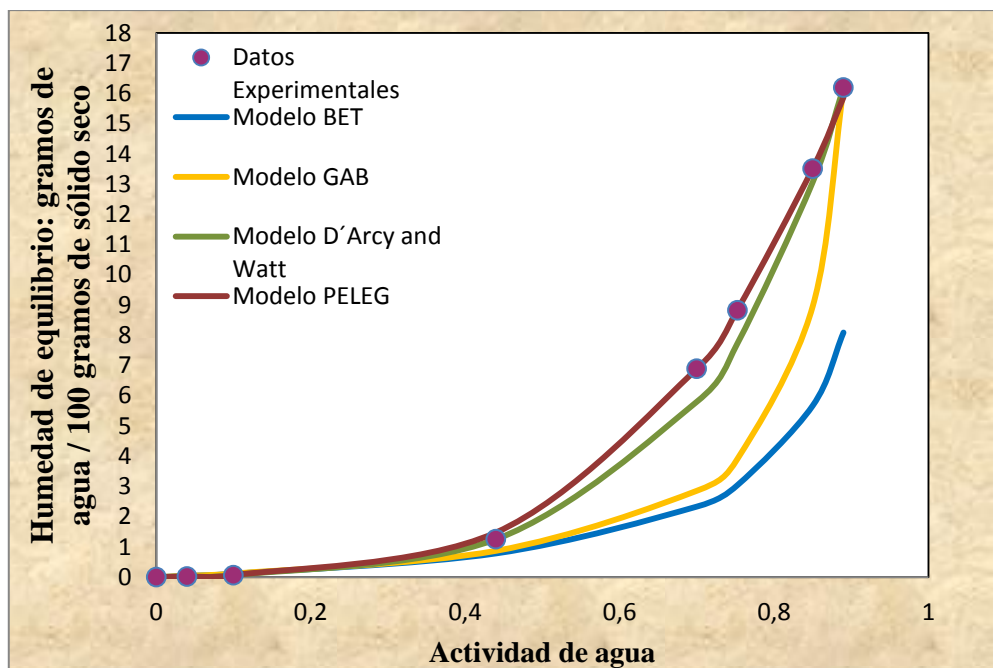


Gráfico 11. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas desorción de humedad de carbonato de sodio a 15°C

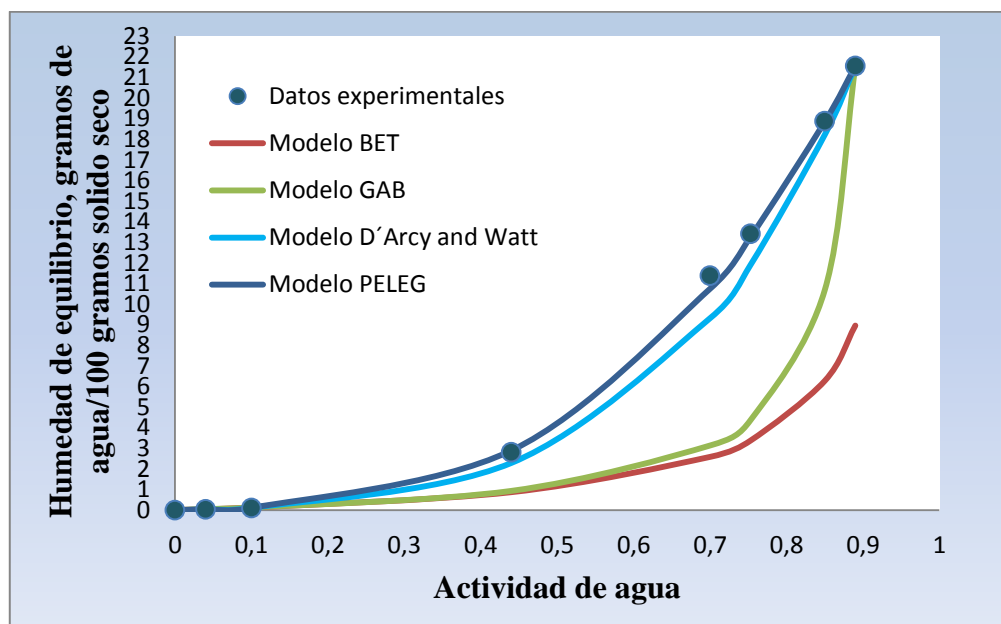


Gráfico 12. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de potasio a 25°C

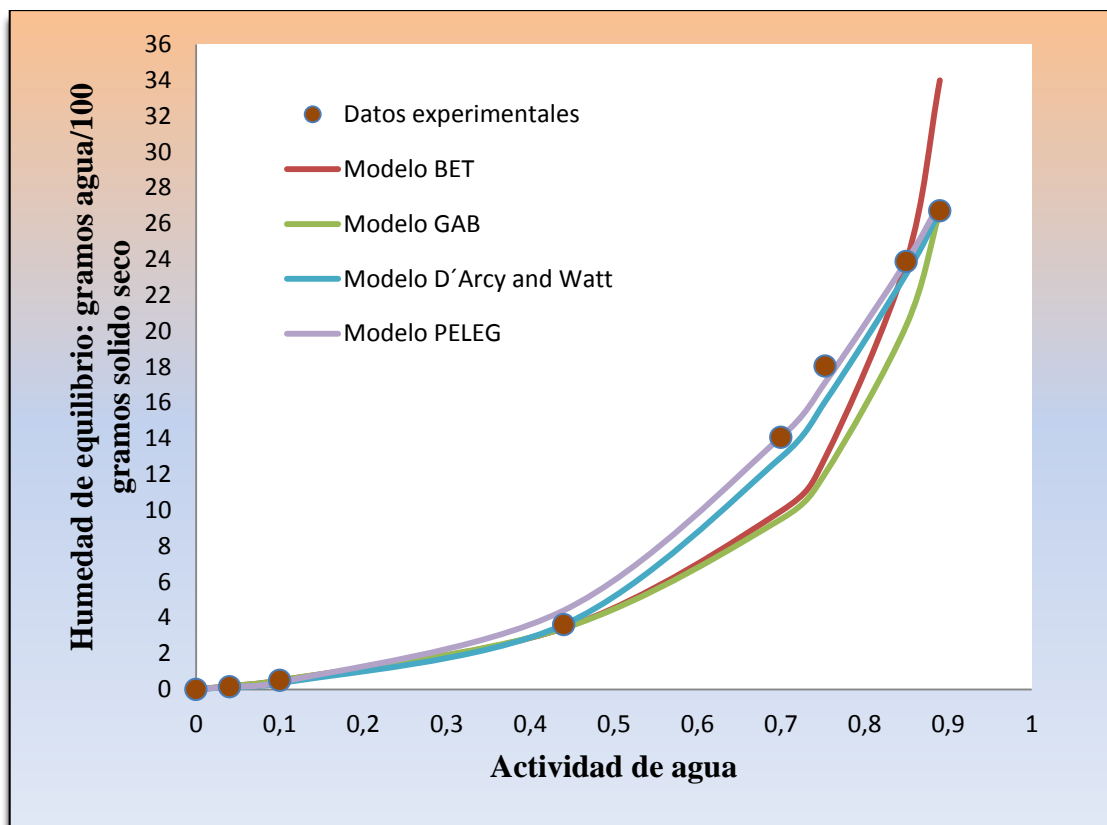


Gráfico 13. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de sodio a 35°C

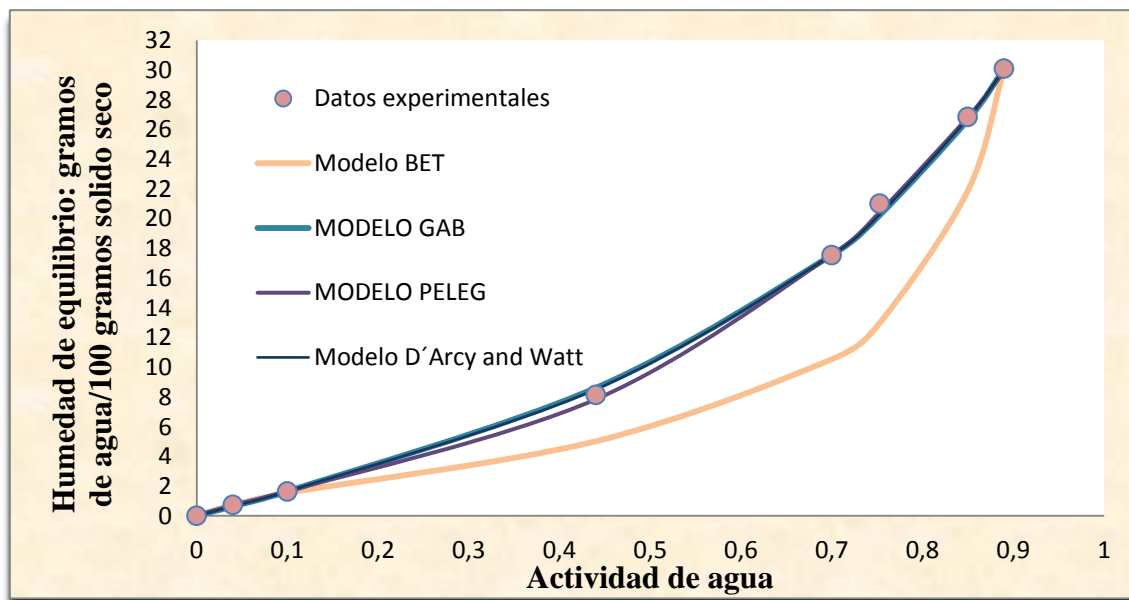


Gráfico 14. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de potasio a 15°C

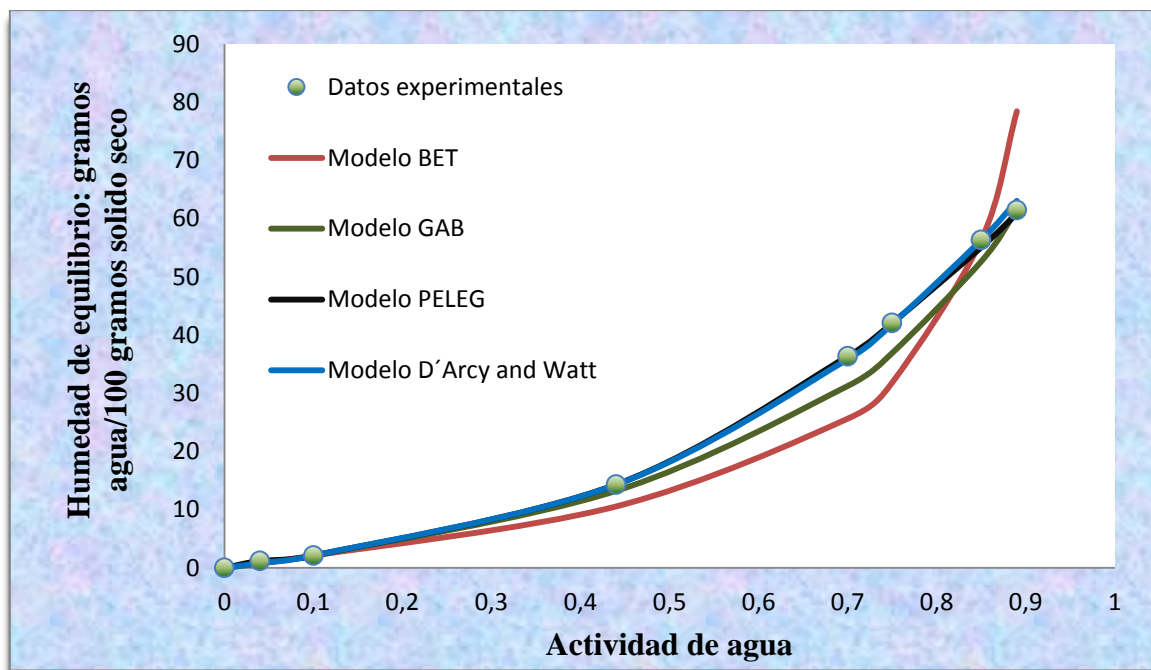


Gráfico 15. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de potasio a 25°C

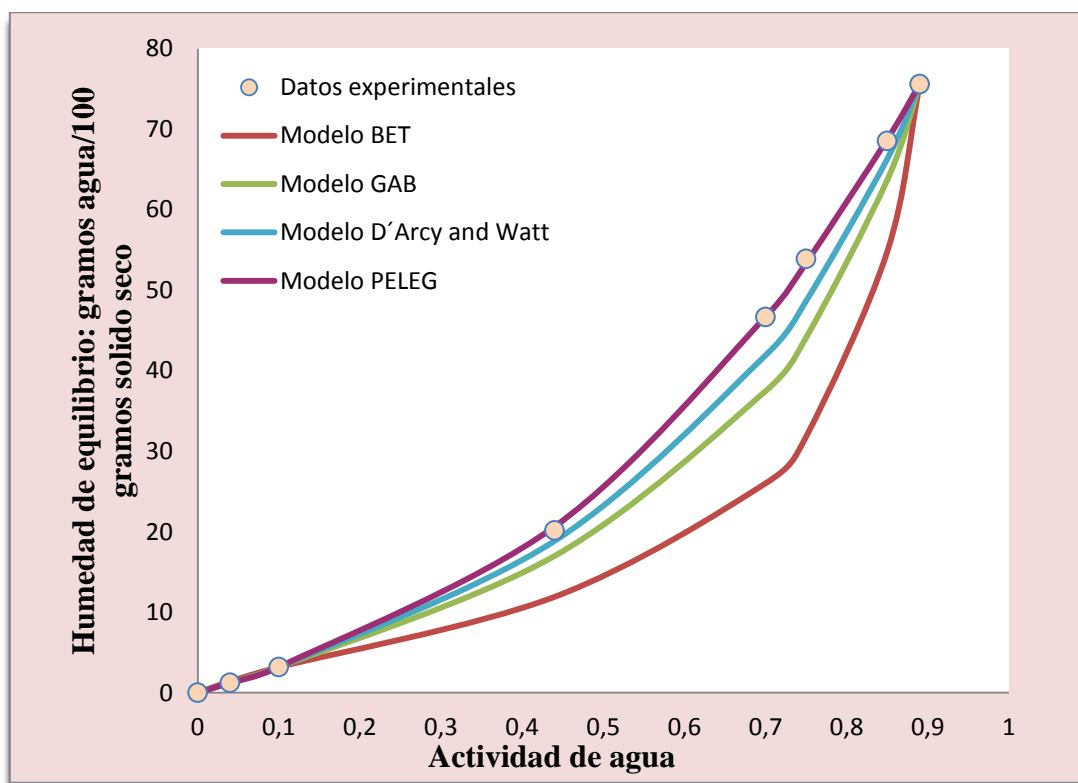


Gráfico 16. Ajuste de los cuatro modelos matemáticos a las isothermas de sorción de humedad de carbonato de potasio a 35°C

El modelo de BET se ajusta a los primeros puntos de la isoterma de sorción del carbonato de potasio y carbonato de sodio, esto es para actividades de agua de 0,04 hasta 0,1. Para actividades de agua superiores, este modelo no se ajusta a los datos experimentales, tal como lo describió Bell & Labuza. En el caso del carbonato de potasio, el ajuste se efectuó adicionalmente para la actividad de agua de 0,89.

El modelo de GAB presenta un ajuste en los primeros puntos de la isoterma de adsorción de carbonato de sodio, en actividades de agua de 0,04 a 0,1 y para el último punto experimental; para 35°C se presenta un ajuste en actividades de agua de 0,04 a 0,44 y 0,89. Los datos experimentales del carbonato de potasio se adaptan en mayor grado a este modelo, para las actividades de agua de 0,04 a 0,44; especialmente a la temperatura de 15°C. El modelo propuesto por PELEG se acondiciona satisfactoriamente a los datos experimentales del carbonato de potasio y carbonato de sodio, para las tres temperaturas de estudio (15°C, 25°C y 35°C). Este modelo es más amplio por abarcar las actividades de agua de 0,04 a 0,89. El modelo de D'Arcy and Watt presenta un buen ajuste de los puntos experimentales para las dos sustancias analizadas, pero en menor grado respecto al modelo de PELEG, por alejarse de la tendencia en el rango de actividad de agua de 0,7 a 0,75.

El ajuste para cada modelo se detalla en los anexos R y S.

3.1.8 Regiones de las isotermas de sorción de humedad. Las regiones en las que se divide, generalmente la isoterma de sorción son tres, e indican la distribución de agua en un producto. Las regiones definidas para el carbonato de sodio y carbonato de potasio se presentan en los gráficos 17 y 18, respectivamente. La primera región está constituida por el agua de la monocapa, este valor fue obtenido por la ecuación de BET. Se determinó analíticamente la actividad de agua correspondiente a la monocapa, empleando la ecuación de PELEG, utilizando la herramienta SOLVER de Excel para el cálculo. Los valores de la monocapa y de la actividad de agua que limitan esta zona se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 43. Actividad de agua a nivel de monocapa, obtenida con la ecuación de PELEG a 15, 25 y 35°C

Prueba	Muestra	Parámetros	Temperatura (°C)		
			15	25	35
Isoterma de sorción	Carbonato de sodio	m^*	1,00	1,11	4,17
		a_w^{**}	0,39	0,31	0,43
	Carbonato de potasio	m^*	3,38	9,08	8,54
		a_w^{**}	0,22	0,34	0,24

*Valores de monocapa calculados aplicando el modelo de BET, en g agua/100 g s.s

** Valores de a_w calculados con el modelo de PELEG, con base a los datos de m^*

La región de multicapas inicia con la finalización de la región de monocapa y se extiende hasta donde la curvatura se pronuncia. Además analíticamente se calculó el valor del límite superior de actividad de agua, comparando las gradientes de humedad.

Tabla 44. Actividad de agua a límite superior de la región de multicapas en isotermas de sorción

Temperatura, °C	Límite superior aw	
	Carbonato de sodio	Carbonato de potasio
15	0,85	0,71
25	0,75	0,7
35	0,73	0,7

La región de condensación capilar en el carbonato de sodio y carbonato de potasio empieza en actividades de agua superiores a 0,7. Esto concuerda con lo visualizado experimentalmente. En la exposición al ambiente generado por el Yoduro de Potasio (aw de 0,7), el carbonato de potasio empieza a humedecerse; en el frasco con solución saturada de cloruro de sodio (aw de 0,75), los gránulos se derriten casi completamente. A medida que se incrementó la temperatura, a mayor aw, los carbonatos se tornaron más higroscópicos. A 35°C y a la aw de trabajo de 0,75 el carbonato de sodio tiende a diluirse completamente.

El sólido se disuelve en la humedad que se condensa en su superficie, dando lugar a una capa muy fina de una disolución muy concentrada, y cuya presión de vapor es muy baja. Para que la presión de vapor de esta disolución pueda igualar la presión parcial del vapor de agua del aire, el sólido absorbe más agua. Este proceso continúa hasta que toda la masa del sólido se disuelve.

En el caso del carbonato de sodio, esta sal adsorbe una cantidad relativamente baja de humedad ambiental por lo que el límite de la región de multicapas y de condensación capilar es alto comparado con el carbonato de potasio.

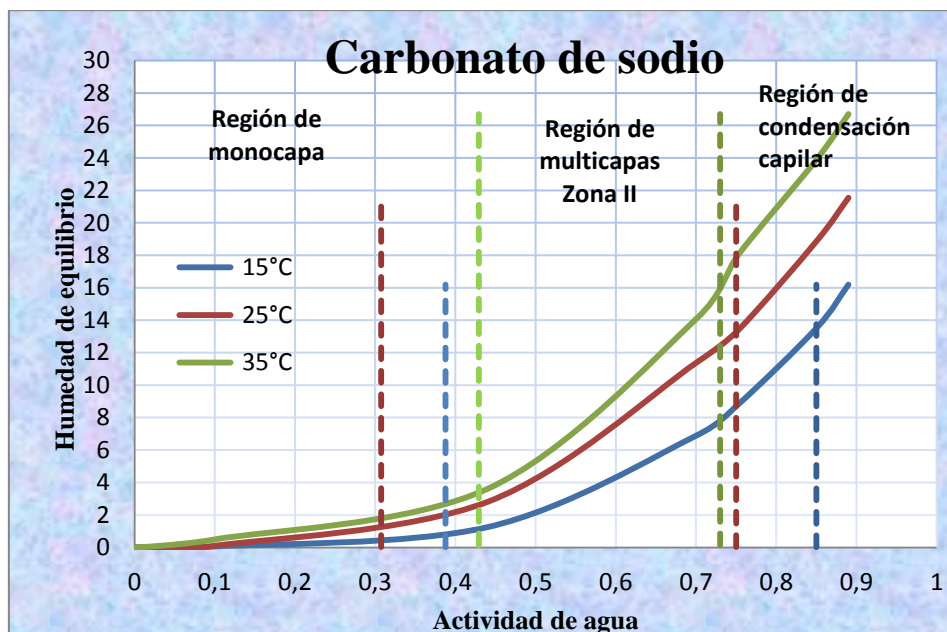


Gráfico 17. Regiones de la isoterma de sorción del carbonato de sodio

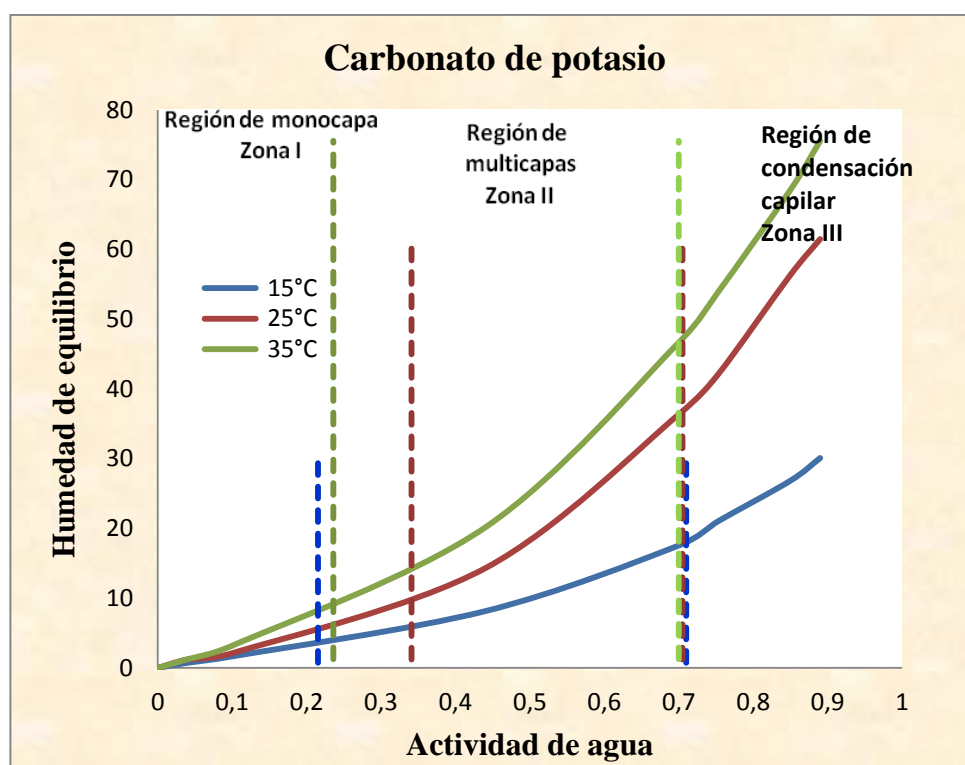


Gráfico 18. Regiones de la isoterma de sorción del carbonato de potasio

3.2 Análisis de formación de hidratos de carbonato de potasio y carbonato de sodio

Los hidratos son compuestos definidos, el agua de un hidrato se llama agua de hidratación y, más frecuentemente, agua de cristalización.

Este fenómeno lo presentan aquellas sales hidratadas cuya presión de vapor es menor que la presión de vapor del agua del aire circundante, esto es, los cristales de sales anhidras captan el vapor de agua para transformarse en hidratos salinos o sales cristalizadas con moléculas de agua. Inversamente, las sales hidratadas, al calentarse vuelven a formar la sal anhidra, algunas veces a través de la formación de sales menos hidratadas.

3.2.1 *Cálculo modelo para determinación de porcentaje en masa y moles de las muestras sometidas a la experimentación*

Carbonato de sodio a 15°C y 0,04 de actividad de agua

$$\text{masa de agua en la muestra} = m_3 - m_1 - m_2 \quad (23)$$

Donde:

m₃=masa vial con muestra final en el equilibrio, 11,7685 g

m₂=masa muestra seca de carbonato de sodio, 2,0085 g

m₁=masa vial tarado, 9,7596 g

$$\text{masa de agua en la muestra} = (11,7685 - 9,7596 - 2,0085)g = 0,0004 g$$

$$\text{moles de agua en la muestra} = \frac{\text{masa de agua en la muestra}}{\text{Peso molecular agua}} \quad (24)$$

$$\text{moles de agua en la muestra} = \frac{0,0004 g}{18 g/mol} = 2,22 * 10^{-5} mol$$

$$\% \text{agua en la muestra} = \frac{\text{masa de agua}}{m_3 - m_1} * 100 \quad (25)$$

$$\% \text{agua en la muestra} = \frac{0,0004 g}{11,7685 - 9,7596} * 100 = 0,0199\%$$

$$\% \text{carbonato de sodio en la muestra} = 100 - \% \text{agua en la muestra} \quad (26)$$

$$\% \text{carbonato de sodio en la muestra} = 100 - 0,0199 = 99,9801\%$$

Tabla 45. Análisis de formación de hidratos de carbonato de sodio

Temperatura (°C)	aw	SORCIÓN			
		<i>Carbonato de sodio</i>			
		%Na ₂ CO ₃	Moles Na ₂ CO ₃	%H ₂ O	Moles H ₂ O
15	0,04	99,9803	0,0191	0,0197	2,2222E-05
	0,1	99,9365	0,0193	0,0635	0,0001
	0,44	98,7631	0,0193	1,2369	0,0014
	0,7	93,5564	0,0198	6,4436	0,0080
	0,75	91,8897	0,0196	8,1103	0,0102
	0,85	88,0981	0,0194	11,9019	0,0155
	0,89	86,0696	0,0194	13,9304	0,0185
25	0,04	99,9693	0,0197	0,0307	3,5556E-05
	0,1	99,8971	0,0191	0,1029	0,0001
	0,44	97,2674	0,0191	2,7326	0,0032
	0,7	89,7873	0,0190	10,2127	0,0128
	0,75	88,1812	0,0193	11,8188	0,0152
	0,85	84,1304	0,0191	15,8696	0,0212
	0,89	82,2807	0,0196	17,7193	0,0249
35	0,04	99,8635	0,0192	0,1365	0,0002
	0,1	99,5046	0,0190	0,4954	0,0006
	0,44	96,5158	0,0192	3,4842	0,0041
	0,7	87,6646	0,0193	12,3354	0,0160
	0,75	84,7142	0,0191	15,2858	0,0203
	0,85	80,7210	0,0191	19,2790	0,0268
	0,89	78,9259	0,0193	21,0741	0,0304

De acuerdo con los resultados obtenidos, el carbonato de sodio anhidro tiende a adquirir bajas cantidades de agua. En base a la bibliografía consultada, esta sustancia se transforma en el monohidrato al exponer la sal anhidra a condiciones ambientales.

A 15°C el porcentaje de agua sorbida varía desde 0,0197% a 13,9304%. A esta temperatura y a las actividades de agua de estudio, el carbonato de sodio se hidrata ligeramente sin convertirse en monohidrato. A 25°C a actividades de agua de 0,04 a 0,75, el porcentaje de agua adsorbida varía desde 0,0307% a 11,8188%. Para 0,85 de actividad de agua, la humedad adsorbida asciende a 15,8696%, esto indica la formación del Na₂CO₃.H₂O, cuya composición es 85.48% de Na₂CO₃ y 14.52% de agua de cristalización; para actividades de agua superiores el porcentaje se incrementa hasta 17,7193%. Para 35°C, el porcentaje de humedad sorbida a actividades de agua de 0,04 a 0,7, oscila entre 0,1365% y 12,3354%. A 0,75 de aw, el porcentaje de agua sorbida es de 15,2858%, observándose la formación del Na₂CO₃.H₂O entre la actividad de agua de 0,7 y 0,75. Para actividades de agua superiores la humedad asciende hasta 21,0741%.

Tabla 46. Análisis de formación de hidratos de carbonato de potasio

Temperatura (°C)	aw	SORCIÓN			
		<i>Carbonato de potasio</i>			
		%K ₂ CO ₃	Moles K ₂ CO ₃	%H ₂ O	Moles H ₂ O
15	0,04	99,2707	0,0153	0,7293	0,0009
	0,1	98,3784	0,0148	1,6216	0,0019
	0,44	92,4756	0,0150	7,5244	0,0094
	0,7	85,0707	0,0148	14,9293	0,0200
	0,75	82,6345	0,0154	17,3655	0,0248
	0,85	78,8400	0,0151	21,1600	0,0311
	0,89	76,8812	0,0149	23,1188	0,0345
25	0,04	98,8039	0,0147	1,1961	0,0014
	0,1	97,9344	0,0150	2,0656	0,0024
	0,44	87,4948	0,0147	12,5052	0,0161
	0,7	73,3404	0,0146	26,6596	0,0407
	0,75	70,3867	0,0149	29,6133	0,0480
	0,85	63,9654	0,0148	36,0346	0,0640
	0,89	61,9222	0,0148	38,0778	0,0699
35	0,04	98,7625	0,0148	1,2375	0,0014
	0,1	96,9160	0,0147	3,0840	0,0036
	0,44	83,2355	0,0146	16,7645	0,0227
	0,7	68,1879	0,0147	31,8121	0,0528
	0,75	64,9845	0,0147	35,0155	0,0610
	0,85	59,3356	0,0148	40,6644	0,0781
	0,89	56,9583	0,0147	43,0417	0,0853

A 15°C a actividades de agua de 0,04 a 0,7 el porcentaje de agua adsorbida varía desde 0,7293% a 14,9293%.

En la actividad de agua de 0,75 se observa que el agua adsorbida asciende a 17,3655%, esto indica la formación inicial del K₂CO₃·1½ H₂O (hidrato más estable), cuya composición es de 83,66% de K₂CO₃ y 16,34% de agua de cristalización; para actividades de agua superiores el porcentaje de agua sube hasta 23,1188% debido a la propiedad de deliquesencia que presenta esta sustancia, siendo visible en las actividades de 0,85 y 0,89 que esta sal se disuelve casi por completo.

A 25°C a actividades de agua de 0,04 a 0,44, el porcentaje de agua sorbida varía desde 1,1961% a 12,5052%.

En actividades de agua de 0,7 se observa que el agua sorbida asciende a 26,6596%, esto indica que la formación del K₂CO₃·1½ H₂O se efectúa entre actividades de 0,44 y 0,7; para actividades de agua superiores el porcentaje se incrementa hasta 38,0778%, observándose para actividades de agua de 0,75 a 0,89, la disolución del carbonato de potasio en la humedad circundante.

Para 35°C el porcentaje de agua sorbida en carbonato de potasio para actividades de agua de 0,04 y 0,44 es de 1,2375 y 3,0840 respectivamente; la formación del hidrato $K_2CO_3 \cdot 1\frac{1}{2} H_2O$ se establece a 0,44 de actividad de agua, en donde el porcentaje de hidratación es de 16,7645%. Para el resto de actividades de agua el contenido de humedad se incrementa considerablemente hasta 43,0417%, percibiéndose a las actividades de agua de 0,7 a 0,89 el comportamiento delicuescente característico de esta sustancia.

3.3 Análisis de formación de bicarbonatos en carbonatos por acción del dióxido carbono del aire

La exposición de las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio al aire confinado en el recipiente hermético, provoca que éstas adquieran humedad y a su vez sufran cambios en su composición, por acción del dióxido de carbono presente en el aire.

3.3.1 Cálculo de la solubilidad del CO_2 en agua adsorbida por las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio. Al estar en contacto el CO_2 del aire con la humedad presente en las muestras de las dos sustancias de estudio, parte de este gas va a solubilizarse en el agua.

3.3.1.2 Aplicación de la ley de Henry Se consideraron las siguientes ecuaciones para el cálculo de la solubilidad del CO_2 en el agua :

$$[X_{(aq)}] = KP_X \quad (27)$$

$$[X] = V_{agua\ adsorbida} * X_{(aq)} \quad (28)$$

Para calcular la presión de aire en el interior del frasco se toma en cuenta la presión de vapor de agua generada por la solución salina saturada:

$$P_X = (P_{atmosférica} - P_{vapor\ de\ agua} * hr) * Y_X \quad (29)$$

$$[X_{(aq)}] = K * (P_{atmosférica} - P_{vapor\ de\ agua} * hr) * Y_X \quad (30)$$

$$V_{agua\ sorbida, l} = \frac{moles_{agua\ adsorbida} * P_{m_{agua}}}{\rho_{agua}} \quad (31)$$

Donde:

$[X_{(aq)}]$: Moles de gas solubles por litro de agua, $mol_{CO_2} l_{agua}^{-1}$

$[X]$: moles del gas soluble en un volumen definido de agua

K: Constante Ley de Henry, $mol\ l^{-1} atm^{-1}$

P_X : Presión parcial del gas X, atm

hr: Humedad relativa del aire

Y_X : Fracción molar del gas (CO_2 en el aire del recipiente)

P_m : Peso molecular agua, $gmol^{-1}$

ρ : Densidad, $g\ l^{-1}$

3.3.1.3 Cálculo modelo para determinar las moles de CO_2 solubles en el agua sorbida en una muestra. Se requieren los siguientes datos teóricos para el cálculo modelo:

Tabla 47. Datos para cálculo de la solubilidad del dióxido carbono del aire

Temperatura, °C	Densidad, g/L	Presión de vapor, atm	Presión atmosférica Quito, atm	Fracción volumétrica CO_2 en el aire	K, $\frac{mol_{CO_2}}{L_{agua} \cdot atm^{-1}}$
15	999,099	0,0168	0,7172	0,0003	$4,52 \cdot 10^{-2}$

Tabla 48. Características de la muestra

Sustancia	Carbonato de sodio
Temperatura	15°C
Actividad de agua	0,04
Moles de agua en la muestra	$2,2222 \cdot 10^{-5} mol$

Aplicando la ecuación 36 se calcularon las moles de CO_2 soluble en el agua sorbida por las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio.

$$[X_{(aq)}] = 4,52 \cdot 10^{-2} mol_{CO_2} atm^{-1} l^{-1}_{agua} \\ * [(0,7172 - 0,0168 * 0,04) * 0,0003] atm$$

$$[X_{(aq)}] = 9,7161 \cdot 10^{-6} mol_{CO_2} l^{-1}_{agua}$$

$$V_{agua\ adsorbida}, litros = \frac{2,2222 \cdot 10^{-5} mol * 18 gmol^{-1}}{999,099 g\ l^{-1}}$$

$$V_{agua\ adsorbida} = 4,0035 \cdot 10^{-7} l$$

$$[X] = 4,0035 \cdot 10^{-7} l * 9,7161 \cdot 10^{-6} mol_{CO_2} l^{-1}_{agua}$$

$$[X] = 3,8898 * 10^{-12} \text{ moles } CO_2$$

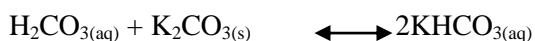
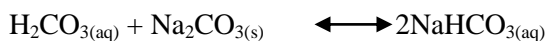
Tabla 49. Solubilidad de CO₂ en moles de agua presente en muestras de carbonato de sodio a diferentes actividades de agua y temperaturas

Temperatura °C	aw	Moles de agua sorbida	Volumen de agua sorbida, l	Moles de CO ₂ solubles/ l agua	Moles de CO ₂ solubles en agua sorbida
15	0,04	2,2222E-05	2,5683E-05	9,7162E-06	3,8900E-12
	0,1	7,2222E-05	1,3012E-06	9,7025E-06	1,2625E-11
	0,44	1,4256E-03	2,5683E-05	9,6249E-06	2,4720E-10
	0,7	8,0122E-03	1,4435E-04	9,5656E-06	1,3808E-09
	0,75	1,0183E-02	1,8347E-04	9,5542E-06	1,7529E-09
	0,85	1,5459E-02	2,7851E-04	9,5313E-06	2,6546E-09
	0,89	1,8460E-02	3,3258E-04	9,5222E-06	3,1669E-09
25	0,04	3,5556E-05	6,4190E-07	7,2598E-06	4,6600E-12
	0,1	1,1556E-04	2,0862E-06	7,2408E-06	1,5105E-11
	0,44	3,1656E-03	5,7149E-05	7,1330E-06	4,0764E-10
	0,7	1,2756E-02	2,3028E-04	7,0506E-06	1,6236E-09
	0,75	1,5221E-02	2,7479E-04	7,0347E-06	1,9331E-09
	0,85	1,5221E-02	3,8219E-04	7,0030E-06	2,6765E-09
	0,89	2,4894E-02	4,4943E-04	6,9904E-06	3,1417E-09
35	0,04	1,5444E-04	1,0080E-05	5,7056E-06	1,5957E-11
	0,1	5,5667E-04	1,0080E-05	5,6790E-06	5,7245E-11
	0,44	4,0822E-03	7,3921E-05	5,5284E-06	4,0867E-10
	0,7	1,5957E-02	2,8894E-04	5,4133E-06	1,5641E-09
	0,75	2,0298E-02	3,6755E-04	5,3912E-06	1,9815E-09
	0,85	2,6809E-02	4,8546E-04	5,3469E-06	2,5957E-09
	0,89	3,0414E-02	5,5075E-04	5,3292E-06	2,9350E-09

Tabla 50. Solubilidad de CO₂ en moles de agua sorbida en muestras de carbonato de potasio a diferentes actividades de agua y temperaturas

Temperatura °C	aw	Moles de agua sorbida	Volumen de agua sorbida, l	Moles de CO ₂ solubles/l agua	Moles de CO ₂ solubles en agua sorbida
15	0,04	8,6333E-04	1,5554E-05	9,7162E-06	1,5113E-10
	0,1	1,8667E-03	3,3630E-05	9,7025E-06	3,2630E-10
	0,44	9,3956E-03	1,6927E-04	9,6249E-06	1,6292E-09
	0,7	1,9974E-02	3,5986E-04	9,5656E-06	3,4423E-09
	0,75	2,4780E-02	4,4644E-04	9,5542E-06	4,2654E-09
	0,85	3,1123E-02	5,6073E-04	9,5313E-06	5,3445E-09
	0,89	3,4482E-02	6,2124E-04	9,5222E-06	5,9156E-09
25	0,04	1,3678E-03	2,4693E-05	7,2598E-06	1,7927E-10
	0,1	2,4256E-03	4,3789E-05	7,2408E-06	3,1707E-10
	0,44	1,6132E-02	2,9124E-04	7,1330E-06	2,0774E-09
	0,7	4,0707E-02	7,3489E-04	7,0506E-06	5,1814E-09
	0,75	4,7968E-02	8,6598E-04	7,0347E-06	6,0919E-09
	0,85	6,3988E-02	1,1552E-03	7,0030E-06	8,0899E-09
	0,89	6,9913E-02	1,2622E-03	6,9904E-06	8,8230E-09
35	0,04	1,4233E-03	2,5774E-05	5,7056E-06	1,4705E-10
	0,1	3,6056E-03	6,5290E-05	5,6790E-06	3,7078E-10
	0,44	2,2656E-02	4,1025E-04	5,5284E-06	2,2680E-09
	0,7	5,2769E-02	9,5554E-04	5,4133E-06	5,1726E-09
	0,75	6,0981E-02	1,1043E-03	5,3912E-06	5,9532E-09
	0,85	7,8100E-02	1,4142E-03	5,3469E-06	7,5618E-09
	0,89	8,5259E-02	1,5439E-03	5,3292E-06	8,2276E-09

3.3.2 Cálculo de la composición de bicarbonato de sodio y bicarbonato de potasio en las muestras húmedas de cada determinación experimental. De acuerdo con las reacciones químicas teóricas que se producen en presencia de los carbonatos de sodio y carbonato de potasio, del agua sorbida y el dióxido de carbono:



Relación estequiométrica:

$$\frac{1 \text{ mol CO}_2 \text{ consumida}}{2 \text{ moles NaHCO}_3 \text{ formadas}}; \frac{1 \text{ mol CO}_2 \text{ consumida}}{2 \text{ moles KHCO}_3 \text{ formadas}}$$

masa NaHCO₃ formada

$$= \text{moles NaHCO}_3 \text{ formadas} * \text{peso molecular NaHCO}_3 \quad (32)$$

masa $KHCO_3$ formada

$$= \text{moles } KHCO_3 \text{ formadas} * \text{peso molecular } KHCO_3 \quad (33)$$

3.3.2.1 Cálculo tipo para determinar la formación de bicarbonato en una muestra

Tabla 51. Características de la muestra

Sustancia	Carbonato de sodio
Temperatura	15°C
Actividad de agua	0,04
Moles de CO_2 solubles en agua adsorbida	3,8900E-12
Moles de agua adsorbida	2,2222E-05

$$\frac{1 \text{ mol } CO_2 \text{ consumida}}{2 \text{ moles } NaHCO_3 \text{ formadas}} = \frac{3,8900 * 10^{-12}}{2 * 3,8900 * 10^{-12}}$$

$$\text{moles } NaHCO_3 \text{ formadas} = 7,7799 * 10^{-12}$$

masa $NaHCO_3$ formada = moles $NaHCO_3$ formadas * peso molecular

$$\text{masa } NaHCO_3 \text{ formada} = 7,7799E^{-12} \text{ mol} * 84 \frac{g}{mol}$$

$$\text{masa } NaHCO_3 \text{ formada} = 6.5351 * 10^{-10} g$$

3.3.3 Cálculo de la fracción másica de bicarbonato de sodio y bicarbonato de potasio en las muestras húmedas de cada determinación experimental. Se determinó la fracción másica a partir de la relación entre la masa de bicarbonato formada respecto a la masa promedio de las cinco réplicas sometidas a cada experimentación:

$$\frac{\text{masa } NaHCO_3 \text{ formados}}{\text{masa de muestra húmeda}} ; \frac{\text{masa } KHCO_3 \text{ formados}}{\text{masa de muestra húmeda}}$$

Tabla 52. Bicarbonato de sodio formado

Temperatura	aw	Masa muestra húmeda, g	Moles NaHCO_3	Masa NaHCO_3 , g	<i>masa NaHCO_3 formados</i> <i>masa de muestra húmeda</i>
15°C	0,04	2,0283	7,7799E-12	6,5351E-10	3,2220E-10
	0,1	2,0487	2,5249E-11	2,1209E-09	1,0352E-09
	0,44	2,0746	4,9439E-10	4,1529E-08	2,0018E-08
	0,7	2,2378	2,7616E-09	2,3197E-07	1,0366E-07
	0,75	2,2602	3,5057E-09	2,9448E-07	1,3029E-07
	0,85	2,3373	5,3092E-09	4,4597E-07	1,9081E-07
	0,89	2,3849	6,3338E-09	5,3204E-07	2,2308E-07
25°C	0,04	2,0864	9,3200E-12	7,8288E-10	3,7523E-10
	0,1	2,0226	3,0211E-11	2,5377E-09	1,2547E-09
	0,44	2,0854	8,1528E-10	6,8484E-08	3,2840E-08
	0,7	2,2482	3,2472E-09	2,7277E-07	1,2133E-07
	0,75	2,3182	3,8662E-09	3,2476E-07	1,4009E-07
	0,85	2,4012	5,3530E-09	4,4965E-07	1,8726E-07
	0,89	2,5279	6,2833E-09	5,2780E-07	2,0879E-07
35°C	0,04	2,0364	3,1913E-11	2,681E-09	1,3164E-09
	0,1	2,0224	1,1449E-10	9,617E-09	4,7553E-09
	0,44	2,1091	8,1734E-10	6,866E-08	3,2553E-08
	0,7	2,3286	3,1283E-09	2,628E-07	1,1285E-07
	0,75	2,3903	3,9631E-09	3,329E-07	1,3927E-07
	0,85	2,5030	5,1914E-09	4,361E-07	1,7422E-07
	0,89	2,5982	5,8700E-09	4,931E-07	1,8978E-07

Tabla 53. Bicarbonato de potasio formado

Temperatura	aw	Masa muestra húmeda, g	Moles KHCO_3	Masa KHCO_3 , g	<i>masa KHCO_3 formados</i> <i>masa de muestra húmeda</i>
15°C	0,04	2,13312	3,0225E-10	3,0255E-08	1,4184E-08
	0,1	2,07306	6,5259E-10	6,5325E-08	3,1511E-08
	0,44	2,24768	3,2585E-09	3,2617E-07	1,4511E-07
	0,7	2,40834	6,8846E-09	6,8915E-07	2,8615E-07
	0,75	2,57134	8,5308E-09	8,5393E-07	3,3210E-07
	0,85	2,6482	1,0689E-08	1,0700E-06	4,0403E-07
	0,89	2,68478	1,1831E-08	1,1843E-06	4,4112E-07
25°C	0,04	2,05872	3,5853E-10	3,5889E-08	1,7433E-08
	0,1	2,11382	6,3414E-10	6,3477E-08	3,0030E-08
	0,44	2,32212	4,1548E-09	4,1590E-07	1,7910E-07
	0,7	2,74848	1,0363E-08	1,0373E-06	3,7742E-07
	0,75	2,91658	1,2184E-08	1,2196E-06	4,1816E-07
	0,85	3,1962	1,6180E-08	1,6196E-06	5,0672E-07
	0,89	3,305	1,7646E-08	1,7664E-06	5,3445E-07
35°C	0,04	2,07036	2,9411E-10	2,9440E-08	1,4220E-08
	0,1	2,10276	7,4156E-10	7,4230E-08	3,5301E-08
	0,44	2,4322	4,5361E-09	4,5406E-07	1,8669E-07
	0,7	2,98578	1,0345E-08	1,0356E-06	3,4683E-07
	0,75	3,1348	1,1906E-08	1,1918E-06	3,8019E-07
	0,85	3,45718	1,5124E-08	1,5139E-06	4,3789E-07
	0,89	3,5654	1,6455E-08	1,6472E-06	4,6198E-07

3.3.4 Cálculo de la composición de carbonato de sodio y carbonato de potasio en las muestras húmedas de cada determinación experimental. Se determinaron las moles de carbonato de sodio y carbonato de potasio que reaccionaron para dar origen a los bicarbonatos de sodio y bicarbonato de potasio correspondientes.

Para esto se basó en la siguiente relación estequiométrica:

$$\frac{1 \text{ mol Na}_2\text{CO}_3 \text{ consumida}}{1 \text{ mol CO}_2 \text{ consumida}}; \frac{1 \text{ mol K}_2\text{CO}_3 \text{ consumida}}{1 \text{ mol CO}_2 \text{ consumida}}$$

Se calcularon las moles de carbonato de sodio y carbonato de potasio que no reaccionaron, constituyen las muestras de cada determinación experimental.

$$\begin{aligned} \text{moles de Na}_2\text{CO}_3 \text{ sin reaccionar} \\ = \text{moles de Na}_2\text{CO}_3 \text{ iniciales} - \text{moles de Na}_2\text{CO}_3 \text{ consumidas} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\text{masa Na}_2\text{CO}_3 \text{ sin reaccionar} = \text{moles Na}_2\text{CO}_3 \text{ remanentes} * \text{peso molecular Na}_2\text{CO}_3 \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \text{moles de K}_2\text{CO}_3 \text{ sin reaccionar} \\ = \text{moles de K}_2\text{CO}_3 \text{ iniciales} - \text{moles de K}_2\text{CO}_3 \text{ consumidas} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \text{masa K}_2\text{CO}_3 \text{ sin reaccionar} \\ = \text{moles K}_2\text{CO}_3 \text{ remanentes} * \text{peso molecular K}_2\text{CO}_3 \end{aligned} \quad (37)$$

Tabla 54. Moles de carbonato de sodio remanentes

Temperatura	aw	Moles Na ₂ CO ₃ iniciales	Moles Na ₂ CO ₃ consumidas	Moles Na ₂ CO ₃ Sin reaccionar
15°C	0,04	0,0191	3,8900E-12	1,9131E-02
	0,1	0,0193	1,2625E-11	1,9315E-02
	0,44	0,0193	2,4720E-10	1,9329E-02
	0,7	0,0198	1,3808E-09	1,9751E-02
	0,75	0,0196	1,7529E-09	1,9594E-02
	0,85	0,0194	2,6546E-09	1,9425E-02
	0,89	0,0194	3,1669E-09	1,9365E-02
25°C	0,04	0,0197	4,6600E-12	1,9677E-02
	0,1	0,0191	1,5105E-11	1,9061E-02
	0,44	0,0191	4,0764E-10	1,9136E-02
	0,7	0,0190	1,6236E-09	1,9043E-02
	0,75	0,0193	1,9331E-09	1,9285E-02
	0,85	0,0191	2,6765E-09	1,9058E-02
	0,89	0,0196	3,1417E-09	1,9621E-02
35°C	0,04	0,0192	1,5957E-11	1,9185E-02
	0,1	0,0190	5,7245E-11	1,8985E-02
	0,44	0,0192	4,0867E-10	1,9204E-02
	0,7	0,0193	1,5641E-09	1,9258E-02
	0,75	0,0191	1,9815E-09	1,9103E-02
	0,85	0,0191	2,5957E-09	1,9061E-02
	0,89	0,0193	2,9350E-09	1,9346E-02

Tabla 55. Moles de carbonato de potasio remanentes

Temperatura	aw	Moles K ₂ CO ₃ iniciales	Moles K ₂ CO ₃ consumidas	Moles K ₂ CO ₃ Sin reaccionar
15°C	0,04	0,0153	1,5113E-10	1,5325E-02
	0,1	0,0148	3,2630E-10	1,4759E-02
	0,44	0,0150	1,6292E-09	1,5042E-02
	0,7	0,0148	3,4423E-09	1,4827E-02
	0,75	0,0154	4,2654E-09	1,5381E-02
	0,85	0,0151	5,3445E-09	1,5111E-02
	0,89	0,0149	5,9156E-09	1,4938E-02
25°C	0,04	0,0147	1,7927E-10	1,4721E-02
	0,1	0,0150	3,1707E-10	1,4982E-02
	0,44	0,0147	2,0774E-09	1,4704E-02
	0,7	0,0146	5,1814E-09	1,4588E-02
	0,75	0,0149	6,0919E-09	1,4859E-02
	0,85	0,0148	8,0899E-09	1,4795E-02
	0,89	0,0148	8,8230E-09	1,4811E-02
35°C	0,04	0,0148	1,4705E-10	1,4796E-02
	0,1	0,0147	3,7078E-10	1,4746E-02
	0,44	0,0146	2,2680E-09	1,4649E-02
	0,7	0,0147	5,1726E-09	1,4732E-02
	0,75	0,0148	5,9532E-09	1,4844E-02
	0,85	0,0148	7,5618E-09	1,4844E-02
	0,89	0,0147	8,2276E-09	1,4695E-02

3.3.5 Cálculo de la fracción másica de carbonato de sodio y carbonato de potasio en las muestras húmedas de cada determinación experimental. Se determinó la fracción másica a partir de la siguiente relación:

$$\frac{\text{gramos Na}_2\text{CO}_3 \text{ formados}}{\text{gramos de muestra húmeda}}; \frac{\text{gramos K}_2\text{CO}_3 \text{ formados}}{\text{gramos de muestra húmeda}}$$

En donde la muestra húmeda es la correspondiente al promedio de las masas resultantes de cada determinación experimental.

Tabla 56. Fracción másica de carbonato de sodio remanente

Temperatura	aw	Masa muestra húmeda, g	Masa Na ₂ CO ₃ sin reaccionar, g	<i>gramos Na₂CO₃ sin reaccionar</i> <i>gramos de muestra húmeda</i>
15°C	0,04	2,0283	2,0279	0,9998
	0,1	2,0487	2,0474	0,9994
	0,44	2,0746	2,0489	0,9876
	0,7	2,2378	2,0936	0,9356
	0,75	2,2602	2,0769	0,9189
	0,85	2,3373	2,0590	0,8809
	0,89	2,3849	2,0526	0,8607
25°C	0,04	2,0864	2,0858	0,9997
	0,1	2,0226	2,0205	0,9990
	0,44	2,0854	2,0284	0,9727
	0,7	2,2482	2,0186	0,8979
	0,75	2,3182	2,0442	0,8818
	0,85	2,4012	2,0201	0,8413
	0,89	2,5279	2,0798	0,8227
35°C	0,04	2,0364	2,0336	0,9986
	0,1	2,0224	2,0124	0,9950
	0,44	2,1091	2,0356	0,9652
	0,7	2,3286	2,0414	0,8767
	0,75	2,3903	2,0249	0,8471
	0,85	2,5030	2,0204	0,8072
	0,89	2,5982	2,0507	0,7893

Tabla 57. Fracción másica de carbonato de potasio remanente

Temperatura	aw	Masa muestra húmeda, g	Masa K_2CO_3 sin reaccionar, g	<i>gramos K_2CO_3 remanentes</i> <i>gramos de muestra húmeda</i>
15°C	0,04	2,1331	2,1179	0,9929
	0,1	2,0731	2,0398	0,9839
	0,44	2,2477	2,0789	0,9249
	0,7	2,4083	2,0491	0,8508
	0,75	2,5713	2,1256	0,8267
	0,85	2,6482	2,0883	0,7886
	0,89	2,6848	2,0644	0,7689
25°C	0,04	2,0587	2,0344	0,9882
	0,1	2,1138	2,0705	0,9795
	0,44	2,3221	2,0320	0,8751
	0,7	2,7485	2,0161	0,7335
	0,75	2,9166	2,0535	0,7041
	0,85	3,1962	2,0447	0,6397
	0,89	3,3050	2,0469	0,6193
35°C	0,04	2,0704	2,0448	0,9876
	0,1	2,1028	2,0379	0,9692
	0,44	2,4322	2,0244	0,8324
	0,7	2,9858	2,0360	0,6819
	0,75	3,1348	2,0514	0,6544
	0,85	3,4572	2,0514	0,5934
	0,89	3,5654	2,0308	0,5696

3.3.6 Determinación experimental del contenido de carbonatos y bicarbonatos en muestras seleccionadas. Se seleccionaron varias muestras de carbonato de sodio como de carbonato de potasio en su estado inicial a la experimentación y luego de ser sometidas a condiciones de temperatura y humedad relativa definidas. Se llevaron a análisis por el método APHA 2320 B , en el Departamento de Petróleos, Energía y Contaminación (DPEC) de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, tal como lo indica la tabla 58:

Tabla 58. Muestras Analizadas DPEC

Código	Sustancia	Muestra	Temperatura, °C	% Humedad Relativa
OE-11-10-04A1	Carbonato de sodio	Inicial	-	-
OE-11-10-10A1		1	15	44
OE-11-10-10A3		3	15	75
OE-11-10-10A5		5	15	89
OE-11-10-10A2		2	35	44
OE-11-10-10A4		4	35	75
OE-11-10-10A6		6	35	89
OE-11-10-04A2	Carbonato de potasio	Inicial	-	-
OE-11-10-10A7		7	15	44
OE-11-10-10A9		9	15	75
OE-11-10-10A11		11	15	89
OE-11-10-10A8		8	35	44
OE-11-10-10A10		10	35	75
OE-11-10-10A12		12	35	89

Para cada muestra analizada se obtuvo el volumen de ácido sulfúrico 0,02 N requerido para la valoración con el indicador fenolftaleína y verde de bromocresol. Estos resultados se muestran en la tabla 59:

Tabla 59. Datos experimentales del análisis de muestras DPEC

N	Volumen de ácido (fenolftaleína), ml	Volumen de ácido (verde bromocresol), ml	volumen total	1/2 Volumen total	Masa muestra, g	volumen aforo, ml
Inicial	9	9,1	18,1	9,1	0,1027	250
1	8	8,2	16,2	8,1	0,1141	
3	7,9	8,3	16,2	8,1	0,1163	
5	8,9	9,4	18,3	9,2	0,1326	
2	7,4	7,7	15,1	7,6	0,1065	
4	9,8	10,5	20,3	10,2	0,1541	
6	8,4	9,1	17,5	8,8	0,1335	
Inicial	7,9	8,1	16	8	0,1126	
7	7,3	8,8	16,1	8,05	0,1377	
9	5,5	6,8	12,3	6,15	0,114	
11	6	7,5	13,5	6,75	0,1269	
8	5,8	7,1	12,9	6,45	0,1115	
10	7,3	9,2	16,5	8,25	0,1583	
12	6,1	8,5	14,6	7,3	0,1946	

3.3.6.1 Cálculo del contenido de carbonatos y bicarbonatos en muestras analizadas por el DPEC. Para determinación de carbonato de sodio y carbonato de potasio, las ecuaciones son:

$$V H^+ = 2 * P \quad (38)$$

Donde:

$V H^+$ = Volumen total de ácido

P = Volumen de ácido gastado en viraje fenolftaleína

$$\frac{\frac{V H^+}{50 \text{ ml muestra}} * \frac{0,02 \text{ Eq-g } H^+}{1000 \text{ ml } H^+} * \frac{1 \text{ Eq-g } CO_3^{2-}}{1 \text{ Eq-g } H^+} * \frac{1 \text{ Eq-g } Na_2CO_3}{1 \text{ Eq-g } CO_3^{2-}} * \frac{53 \text{ g } Na_2CO_3}{1 \text{ Eq-g } Na_2CO_3}}{\frac{250 \text{ ml muestra}}{\text{masa g muestra original}}} = \frac{gNa_2CO_3}{g \text{ muestra original}} \quad (39)$$

$$\frac{\frac{V H^+}{50 \text{ ml muestra}} * \frac{0,02 \text{ Eq-g } H^+}{1000 \text{ ml } H^+} * \frac{1 \text{ Eq-g } CO_3^{2-}}{1 \text{ Eq-g } H^+} * \frac{1 \text{ Eq-g } K_2CO_3}{1 \text{ Eq-g } CO_3^{2-}} * \frac{69,1 \text{ g } K_2CO_3}{1 \text{ Eq-g } K_2CO_3}}{\frac{250 \text{ ml muestra}}{\text{masa g muestra original}}} = \frac{gK_2CO_3}{g \text{ muestra original}} \quad (40)$$

Para determinación de bicarbonato de sodio y bicarbonato de potasio, las ecuaciones son:

$$V H^+ = T - 2P \quad (41)$$

Donde:

$V H^+$ = Volumen total de ácido

P = Volumen de ácido gastado en viraje fenolftaleína

T = Volumen total de ácido gastado(en viraje fenolftaleínay verde bromocresol)

$$\frac{\frac{V H^+}{50 \text{ ml muestra}} * \frac{0,02 \text{ Eq-g } H^+}{1000 \text{ ml } H^+} * \frac{1 \text{ Eq-g } HCO_3^-}{1 \text{ Eq-g } H^+} * \frac{1 \text{ Eq-g } NaHCO_3}{1 \text{ Eq-g } HCO_3^-} * \frac{84 \text{ g } NaHCO_3}{1 \text{ Eq-g } NaHCO_3}}{\frac{250 \text{ ml muestra}}{\text{masa g muestra original}}} = \frac{gNaHCO_3}{g \text{ muestra original}} \quad (42)$$

$$\frac{\frac{V H^+}{50 \text{ ml muestra}} * \frac{0,02 \text{ Eq-g } H^+}{1000 \text{ ml } H^+} * \frac{1 \text{ Eq-g } HCO_3^-}{1 \text{ Eq-g } H^+} * \frac{1 \text{ Eq-g } KHCO_3}{1 \text{ Eq-g } HCO_3^-} * \frac{100,1 \text{ g } KHCO_3}{1 \text{ Eq-g } KHCO_3}}{\frac{250 \text{ ml muestra}}{\text{masa g muestra original}}} = \frac{gKHCO_3}{g \text{ muestra original}} \quad (43)$$

Los resultados se observan en la tabla 62, y se representan en el anexo K.

Tabla 60. Resultados del análisis de muestras DPEC

Código	Sustancia	Muestra	Carbonatos	Bicarbonatos
OE-11-10-04A1	Carbonato de sodio	Inicial	0,928919182	0,00817916
OE-11-10-10A1		1	0,743207713	0,01472393
OE-11-10-10A3		3	0,720034394	0,0288908
OE-11-10-10A5		5	0,711463047	0,03167421
OE-11-10-10A2		2	0,736525822	0,02366197
OE-11-10-10A4		4	0,674107722	0,03815704
OE-11-10-10A6		6	0,666966292	0,04404494
OE-11-10-04A2	Carbonato de potasio	Inicial	0,969609236	0,01777975
OE-11-10-10A7		7	0,73265069	0,10904139
OE-11-10-10A9		9	0,666754386	0,11414912
OE-11-10-10A11		11	0,653427896	0,11832151
OE-11-10-10A8		8	0,718887892	0,11670852
OE-11-10-10A10		10	0,637308907	0,12014529
OE-11-10-10A12		12	0,433206578	0,12345324

La relación entre el porcentaje másico de bicarbonato de sodio (ver tabla 61) y bicarbonato de potasio (ver tabla 62) formados en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio respectivamente , en función del porcentaje de humedad relativa de la experimentación, a temperaturas de 15°C y 35°C ,se muestra a continuación:

Tabla 61. Resultados formación bicarbonato de sodio

Temperatura, °C	Humedad relativa del aire (aw*100)	<i>gramos NaHCO₃ formados</i> <i>gramos de muestra húmeda</i>	Porcentaje
15	44%	2,0018*10 ⁻⁰⁸	6,5351*10 ⁻⁰⁶
	75%	1,3029*10 ⁻⁰⁷	1,3029*10 ⁻⁰⁵
	89%	2,2308*10 ⁻⁰⁷	2,2308*10 ⁻⁰⁵
35	44%	3,2553*10 ⁻⁰⁸	3,2553*10 ⁻⁰⁶
	75%	1,3927*10 ⁻⁰⁷	1,3927*10 ⁻⁰⁵
	89%	1,8978*10 ⁻⁰⁷	1,8978*10 ⁻⁰⁵

Tabla 62.Resultados formación bicarbonato de potasio

Temperatura, °C	Humedad relativa del aire (aw*100)	<i>gramos KHCO₃ formados</i> <i>gramos de muestra húmeda</i>	Porcentaje
15	44%	1,4511*10 ⁻⁰⁷	1,4511*10 ⁻⁰⁵
	75%	3,3210*10 ⁻⁰⁷	3,3210*10 ⁻⁰⁵
	89%	4,4112*10 ⁻⁰⁷	4,4112*10 ⁻⁰⁵
35	44%	1,8669*10-07	1,8669*10-05
	75%	3,8019*10-07	3,8019*10-05
	89%	4,6198*10-07	4,6198*10-05

Tabla 63. Composición en carbonato de sodio de la muestra

Temperatura, °C	Humedad relativa del aire (aw*100)	$\frac{\text{gramos } Na_2CO_3}{\text{gramos de muestra húmeda}}$	Porcentaje
15	44%	0,9876	98,7631
	75%	0,9189	91,8902
	89%	0,8607	86,0674
35	44%	0,9652	96,5160
	75%	0,8471	84,7146
	89%	0,7893	78,9289

Tabla 64. Composición en carbonato de potasio de la muestra

Temperatura, °C	Humedad relativa del aire (aw*100)	$\frac{\text{gramos } K_2CO_3}{\text{gramos de muestra húmeda}}$	Porcentaje
15	44%	0,9249	92,4892
	75%	0,8265	82,6653
	89%	0,7689	76,8926
35	44%	0,8324	83,2353
	75%	0,6544	65,4405
	89%	0,5696	56,9582

Los resultados tanto teóricos como experimentales anteriormente expuestos fueron graficados para analizar su tendencia:

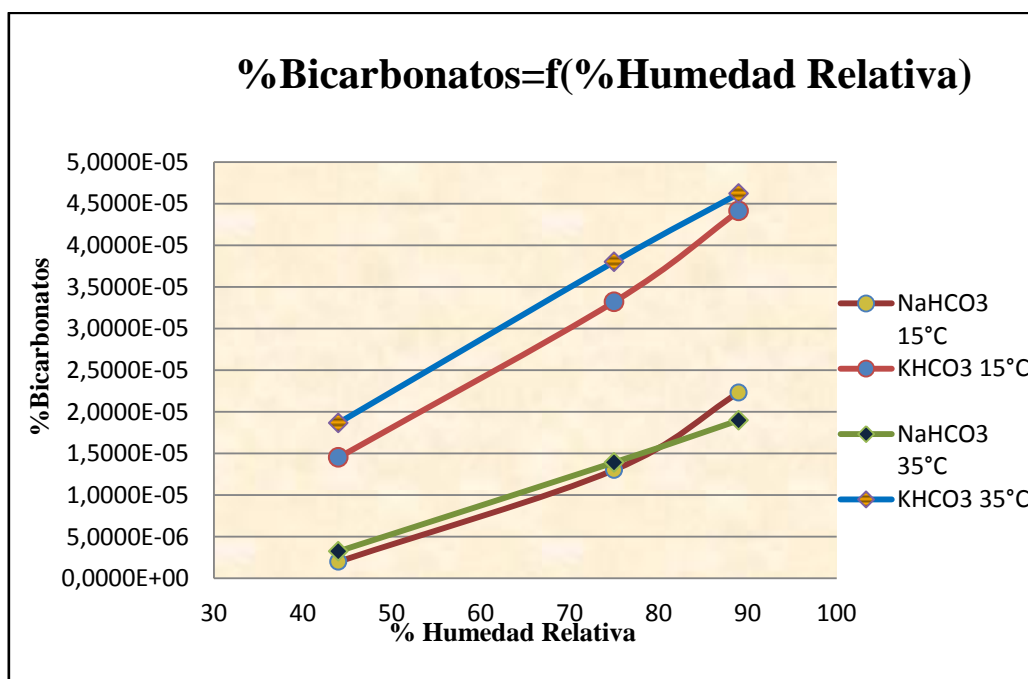


Gráfico 19. Formación teórica de bicarbonatos en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio

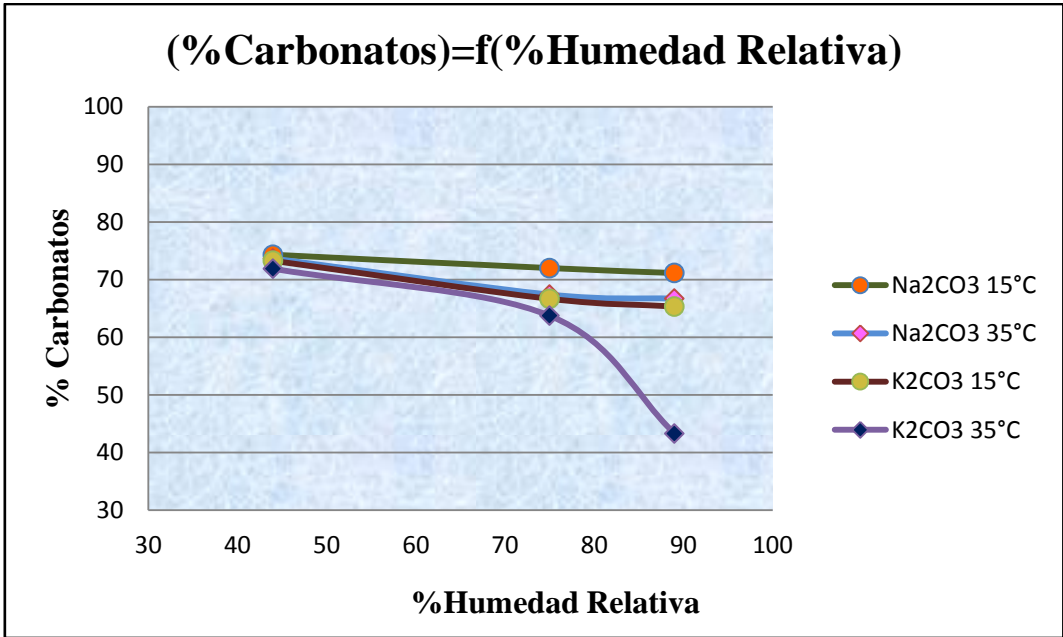


Gráfico 20. Carbonatos presentes en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio (teórico)

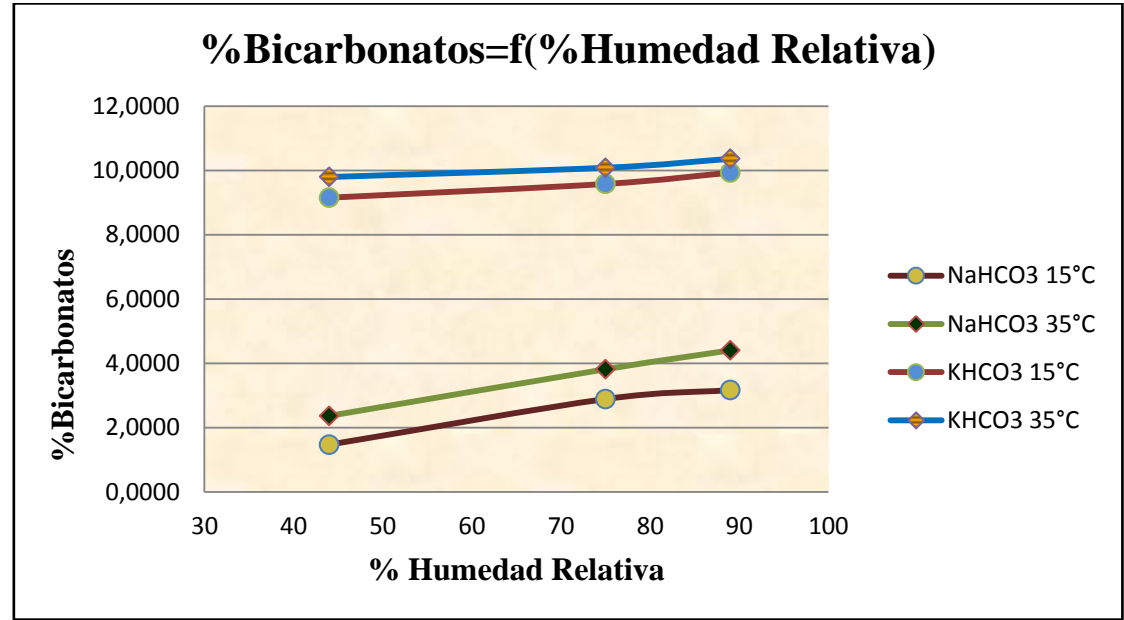


Gráfico 21. Bicarbonatos presentes en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio (análisis DPEC).

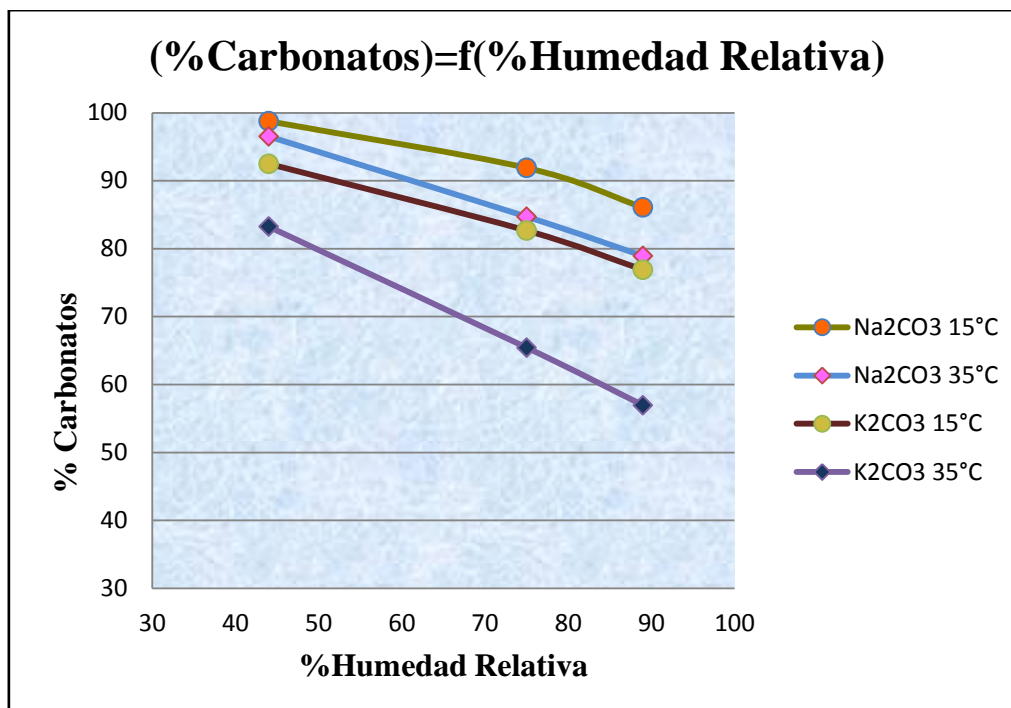


Gráfico 22. Carbonatos presentes en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio (análisis DPEC)

Al analizar los resultados experimentales y teóricos de bicarbonatos y carbonatos presentes en las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio, luego de ser sometidas a las condiciones de experimentación, se encuentran considerables diferencias en las proporciones obtenidas, esto se debe a que las muestras estuvieron en un grado más elevado de contacto con el dióxido de carbono del aire, en la manipulación de las muestras durante la experimentación como en el momento del pesaje de las muestras.

Se observó la misma tendencia de formación de bicarbonatos, así como de reducción de carbonatos, en los análisis teóricos y experimentales (ver gráficos 19 al 22), debido a la mayor higroscopicidad del carbonato de sodio y carbonato de potasio con la temperatura, presentando mayor cantidad de agua sorbida, por lo tanto también es creciente la cantidad de bicarbonatos formados mientras que la cantidad de carbonatos remanentes disminuye.

3.4 Aplicación de resultados

Problema: Se desea calcular en una bodega de almacenamiento, la máxima cantidad de agua que adquieren el carbonato de sodio anhidro y carbonato de potasio anhidro, cuando las condiciones ambientales en promedio son las siguientes:

Humedad relativa del aire: 60%

Temperatura ambiental: 20°C

Además se considera que la presentación de estas sustancias es de **25 kilogramos netos**.



Figura 23. Bodega de almacenamiento productos químicos

Con la ayuda de los modelos matemáticos obtenidos para la predicción de la humedad de equilibrio, se determina esta variable para las dos sustancias a 15°C, 25°C y 35°C, considerando la humedad relativa del aire 60% ($a_w=0,6$).

De acuerdo con las tablas 65 y 66, los modelos matemáticos para determinar la humedad de equilibrio son:

Tabla 65. Modelos matemáticos para la predicción de la humedad de equilibrio del carbonato de sodio a 15°C, 25°C y 35°C

T, °C	$Heq = K_1 a_w^{n1} + K_2 a_w^{n2}$
15	$Heq = 23,3410 a_w^{3,5909} + 0,5755 a_w^{0,9988}$
25	$Heq = 29,5673 a_w^{2,9733} + 0,7154 a_w^{0,9988}$
35	$Heq = 34,3119 a_w^{3,0128} + 3,3652 a_w^{0,9688}$

Tabla 66. Modelos matemáticos para la predicción de la humedad de equilibrio del carbonato de potasio a 15°C, 25°C y 35°C

T, °C	$X^* = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2}$
15	$Heq = 27,6395 a_w^{3,2730} + 12,2209 a_w^{0,8737}$
25	$Heq = 73,7019 a_w^{2,3263} + 4,9313 a_w^{0,4471}$
35	$Heq = 66,9649 a_w^{2,6869} + 29,8989 a_w^{0,9898}$

Tabla 67. Resultados de humedad de equilibrio carbonato de sodio y carbonato de potasio

Temperatura	Humedad de equilibrio g agua/100 g s.s	
	Carbonato de sodio	Carbonato de potasio
15	4,0736	13,0142
25	6,9037	26,3835
35	9,4146	35,0062

Se realiza la respectiva interpolación de datos, para encontrar la humedad de equilibrio temperatura (20°C).

Se grafican los datos en la hoja de Excel, y se busca la ecuación que permita un ajuste satisfactorio de los resultados obtenidos. Se ingresa la temperatura problema en la ecuación de ajuste y se encuentra el valor correspondiente de humedad de equilibrio:

Para el carbonato de sodio:

$$y = -0,0016x^2 + 0,3468x - 0,7701 \quad (50)$$

$$y = -0,0016(20)^2 + 0,3468(20) - 0,7701 = 5,5209$$

Para el carbonato de potasio:

$$y = -0,0237x^2 + 2,2862x - 15,94$$

$$y = -0,0237(20)^2 + 2,2862(20) - 15,94 = 20,304 \quad (51)$$

Estos resultados se observan a continuación:

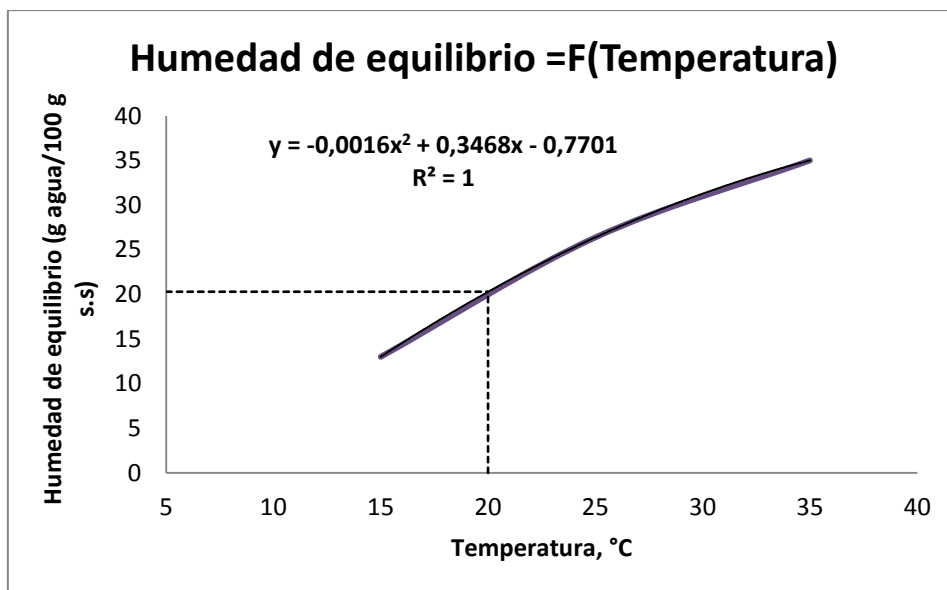


Gráfico 23. Resultados para el carbonato de sodio

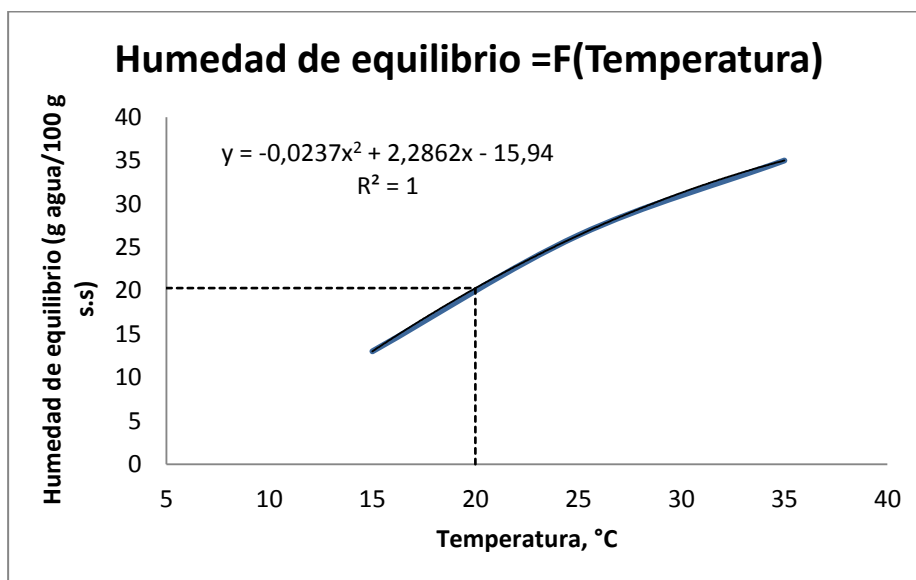


Gráfico 24. Resultados para el carbonato de potasio

Tabla 68. Humedad de equilibrio del carbonato de sodio y carbonato de potasio a 20°C y 60% de Humedad Relativa

Sustancia	Humedad de equilibrio*
Carbonato de sodio	5,5259
Carbonato de potasio	20,304
*expresada como g agua/100 g s.s	

A partir de la humedad de equilibrio obtenida se calcula la máxima cantidad de agua que pueden adquirir las sustancias

$$\text{masa de agua adquirida} = \text{masa neta solido} * \text{Humedad de equilibrio} \quad (52)$$

Para el carbonato de sodio:

$$\text{masa de agua adquirida} = 25000 \text{ g solido} * 5,5259 \frac{\text{g agua}}{100 \text{ g solido}}$$

$$\text{masa de agua adquirida} = 1381,475 \text{ g H}_2\text{O} = 1,3815 \text{ kg H}_2\text{O}$$

Para el carbonato de potasio:

$$\text{masa de agua adquirida} = 25000 \text{ g solido} * 20,304 \frac{\text{g agua}}{100 \text{ g solido}}$$

$$\text{masa de agua adquirida} = 5076 \text{ g H}_2\text{O} = 5,076 \text{ kg H}_2\text{O}$$

Tabla 69. Cantidad máxima de agua adquirida por 25 kilogramos de carbonato de sodio y carbonato de potasio a 20°C y 60% HR

Sustancia	Cantidad máxima de agua adquirida*
Carbonato de sodio	1,3815
Carbonato de potasio	5,076
*Expresado en kg	

A continuación se presentan las Tablas de Humedad de Equilibrio para el Carbonato de sodio y Carbonato de potasio, a distintas temperaturas y humedades relativas, haciendo uso del modelo de PELEG.

Tabla 70. Humedad de Equilibrio para el Carbonato de sodio

Actividad de agua	Humedad relativa (%)	Temperatura del Aire (°C)		
		15	25	35
		Humedad de equilibrio (g agua/100 g s.s)		
0,02	2	0,0116	0,0146	0,0763
0,04	4	0,0233	0,0308	0,1509
0,05	5	0,0294	0,0399	0,1889
0,075	7,5	0,0454	0,0672	0,2876
0,1	10	0,0637	0,1032	0,3949
0,15	15	0,1122	0,2125	0,6486
0,2	20	0,1875	0,3903	0,9766
0,25	25	0,3049	0,6586	1,4052
0,3	30	0,4823	1,0393	1,9605
0,35	35	0,7398	1,5544	2,6685
0,4	40	1,0997	2,2256	3,5555
0,44	44	1,4775	2,8896	4,4114
0,45	45	1,5861	3,0746	4,6474
0,50	50	2,2251	4,1229	5,9705
0,55	55	3,0444	5,3922	7,5508
0,6	60	4,0736	6,9037	9,4146
0,65	65	5,3437	8,6791	11,5881
0,7	70	6,8876	10,7396	14,0974
0,75	75	8,7394	13,1066	16,9688
0,8	80	10,9348	15,8014	20,2286
0,85	85	13,5110	18,8452	23,9030
0,89	89	15,8720	21,5458	27,1587
0,9	90	16,5066	22,2592	28,0183
0,95	95	19,9613	26,0647	32,6009
0,99	99	23,0834	29,4051	36,6211
1,00	100	23,9165	30,2827	37,6771

Tabla 71. Humedad de Equilibrio para el Carbonato de potasio

Actividad de agua	Humedad relativa (%)	Temperatura del Aire (°C)		
		15	25	35
		Humedad de equilibrio (g agua/100 g s.s)		
0,02	2	0,4007	0,8660	0,6241
0,04	4	0,7348	1,2106	1,2476
0,05	5	0,8936	1,3614	1,5627
0,075	7,5	1,2770	1,7269	2,3660
0,1	10	1,6493	2,1091	3,1986
0,15	15	2,3850	3,0044	4,9818
0,2	20	3,1376	4,1450	6,9655
0,25	25	3,9356	5,5835	9,1962
0,3	30	4,8056	7,3568	11,7164
0,35	35	5,7735	9,4938	14,5657
0,4	40	6,8656	12,0185	17,7817
0,44	44	7,8464	14,3317	20,6425
0,45	45	8,1083	14,9520	21,4000
0,50	50	9,5288	18,3130	25,4550
0,55	55	11,1547	22,1183	29,9797
0,6	60	13,0142	26,3835	35,0062
0,65	65	15,1361	31,1231	40,5656
0,7	70	17,5496	36,3507	46,6882
0,75	75	20,2845	42,0789	53,4037
0,8	80	23,3713	48,3199	60,7408
0,85	85	26,8407	55,0851	68,7278
0,89	89	29,9127	60,8820	75,6041
0,9	90	30,7240	62,3854	77,3926
0,95	95	35,0532	70,2314	86,7624
0,99	99	38,8592	76,9079	94,7837
1,00	100	39,8604	78,6332	96,8638

Tabla 72. Resultados Humedad de Equilibrio y Modelo Peleg

HUMEDAD DE EQUILIBRIO (%)			
T, °C	HR	Carbonato de Sodio	Carbonato de Potasio
15	0,04	0,0197	0,7347
	0,1	0,0635	1,6492
	0,44	1,2525	8,1366
	0,71	6,8875	17,5495
	0,76	8,8262	21,0189
	0,85	13,5110	26,8406
	0,89	16,1950	30,0964
25	0,04	0,0307	1,2106
	0,1	0,1030	2,1091
	0,44	2,8094	14,2932
	0,71	11,3743	36,3509
	0,76	13,4033	42,0791
	0,85	18,8622	56,3391
	0,89	21,5457	61,4934
35	0,04	0,1367	1,2530
	0,1	0,4979	3,1838
	0,44	3,6104	20,1421
	0,71	14,0712	46,6537
	0,76	18,0441	53,8829
	0,85	23,8886	68,5330
	0,89	26,7043	75,5727
PARÁMETROS Y MODELO DE PELEG $X^* = K_1 a_w^{n1} + K_2 a_w^{n2}$			
T, °C	Carbonato de Sodio		Carbonato de Potasio
15	$Heq = 23,3410a_w^{3,5909} + 0,5755a_w^{0,9988}$		$Heq = 27,6395a_w^{3,2730} + 12,2209a_w^{0,8737}$
25	$Heq = 29,5673a_w^{2,9733} + 0,7154a_w^{0,9988}$		$Heq = 73,7019a_w^{2,3263} + 4,9313a_w^{0,4471}$
35	$Heq = 34,3119a_w^{3,0128} + 3,3652a_w^{0,9688}$		$Heq = 66,9649a_w^{2,6869} + 29,8989a_w^{0,9898}$

Tabla 73. Resultados de formación de carbonatos y bicarbonatos

	Carbonato de Sodio			Carbonato de Potasio		
T, °C	15					
HR	0,04	0,75	0,89	0,04	0,75	0,89
% Bicarbonatos (Teo)	6,5351*10 ⁻⁰⁶	1,3029*10 ⁻⁰⁵	2,2308*10 ⁻⁰⁵	1,4511*10 ⁻⁰⁵	3,3210*10 ⁻⁰⁵	4,4112*10 ⁻⁰⁵
% Bicarbonatos (Exp)	1,4724	2,8891	3,1674	10,9041	11,4149	11,8322
% Carbonatos (Teo)	98,7631	91,8902	86,0674	92,4892	82,6653	76,8926
% Carbonatos (Exp)	74,3208	72,0034	71,14630	73,2651	66,6754	65,3428
T, °C	35					
HR	0,04	0,75	0,89	0,04	0,75	0,89
% Bicarbonatos (Teo)	3,2553*10 ⁻⁰⁶	1,3927*10 ⁻⁰⁵	1,8978*10 ⁻⁰⁵	1,8669*10 ⁻⁰⁵	3,8019*10 ⁻⁰⁵	4,6198*10 ⁻⁰⁵
% Bicarbonatos (Exp)	2,36620	3,8157	4,4045	11,6709	12,0145	12,3453
% Carbonatos (Teo)	96,5160	84,7146	78,9289	83,2353	65,4405	56,9582
% Carbonatos (Exp)	73,6526	67,4108	66,6966	71,8888	63,7309	43,3207

4. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

- La construcción y ajuste de las isotermas de sorción del carbonato de sodio y carbonato de potasio en el presente trabajo de graduación, tuvo como objeto predecir el contenido de humedad adquirida por estas sustancias en el equilibrio bajo condiciones determinadas de temperatura y humedad relativa de aire. Este concepto es ampliamente utilizado en alimentos, productos farmacéuticos, materiales como la madera, fibras de asbestos, carbón de madera, entre otros; para su aplicación en diseño y optimización de secado, análisis de condiciones de almacenamiento y conservación de materia prima, selección de materiales de empaque.
- Las actividades de agua de las soluciones salinas saturadas preparadas a 25°C presentaron una ligera diferencia respecto a los valores teóricos descritos en la bibliografía, como se muestra en el Anexo F; en la experimentación este valor es aceptable por estar dentro del valor aceptable de estas determinaciones. Además se asumieron estos mismos datos para las tres temperaturas de la experimentación, porque la actividad de agua de las soluciones saturadas varía levemente con la temperatura.
- Las humedades iniciales en promedio para las muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio anhidros fueron de 4,2460 % y 0,6485%.
Estos datos varían considerablemente de las especificaciones técnicas respecto al contenido de humedad, disponibles para cada sustancia en los Anexos B y C.
Este incremento puede atribuirse a la penetración de aire a través del embalaje, las condiciones ambientales en el transporte del producto, la manipulación que pudo ocasionar fisuras en el embalaje y las condiciones de almacenamiento en las respectivas empresas.
- Para la experimentación se partió de muestras de carbonato de sodio y carbonato de potasio previamente secas pero con un contenido de humedad de 0,006% y 0,004% respectivamente. En los cálculos se consideró un contenido de humedad inicial igual a cero (sólido seco) para los dos casos.

- La utilidad de los modelos de ajuste se muestra a través de la predicción de nuevos valores al conocer las constantes y demás parámetros obtenidos desde los datos experimentales.
- La aplicación de la ecuación de BET y GAB demostró validez para ajustar los datos experimentales del segmento inicial de la curva. Los resultados del ajuste obtenidos evidenciaron las limitaciones de los modelos tal como se ha reportado en otros estudios. BET presenta valores de R^2 en un rango de 0,9606 a 0,8981 y de error relativo medio de 5,3913% a 48,4316%; GAB presentó coeficientes de regresión que van desde 0,9991 a 0,7602 y un rango de error relativo medio de 0,2682% a 45,8107%.
- Los valores estimados con el modelo de D'Arcy and Watt mostraron que el ajuste fue satisfactorio, según Furmamiak (2007), este modelo es el más general y eficiente para el ajuste de isotermas de sorción para alimentos de bajo contenido de humedad, presenta valores de R^2 comprendidos en el rango de 0,9917 a 0,9995 y valores de error relativo medio de 0,2376% a 5,0750%.
- El modelo de Peleg, tal como lo indican varios investigadores, es capaz de ajustar correctamente los datos experimentales a cualquier temperatura independientemente de la forma de la isoterma y en todo rango de actividad de agua, y a partir del ajuste se obtienen excelentes coeficientes de regresión comprendidos entre 0,9978 y 0,9999, y resultados de error relativo medio de 0,0086 % a 1,5089 %.
- Según los resultados obtenidos, la humedad de equilibrio del carbonato de sodio y de potasio se incrementa con la actividad de agua o humedad relativa del aire de la cámara y la temperatura ambiental.
- Se puede considerar al carbonato de sodio como un sólido ligeramente higroscópico, para el rango de humedades relativas en estudio, la cantidad máxima de humedad que adquiere es de 26,7043% en base seca. Mientras el carbonato de potasio, el cual muestra deliquesencia presentó la más alta capacidad de hidratación, puede contener como máximo un 75,5727% de humedad.
- Las isotermas de sorción del carbonato de sodio y carbonato de potasio presentan una diferente distribución en las regiones de monocapa, multicapas y de condensación capilar. El carbonato de sodio posee una amplia región para la monocapa y de multicapas en relación al carbonato de potasio esto se debe a el agua se distribuye mayormente sobre la película

superficial (monocapa) y las demás capas adicionales sobre ésta. El carbonato de potasio se hidrata con mayor facilidad y presenta una mayor distribución de humedad en la región tres o de condensación del agua en los poros del material a actividades de agua de 0,7, provocando una disolución del mismo.

- El carbonato de sodio se transforma en el monohidrato al exponer la sal anhidra a condiciones ambientales de 25°C y actividad de agua de 0,85; a 35°C y una actividad de agua de 0,75. Para actividades de agua superiores a las indicadas la sal adquirió humedad adicional, sin convertirse en el hidrato más cercano.
- El carbonato de potasio adquirió 1,5 moléculas de agua de hidratación, a 15°C a una actividad de agua de 0,7; a 25°C y 35°C en el rango comprendido entre 0,44 y 0,7 de actividad de agua. En actividades de agua superiores a 0,7 las muestras empiezan a humedecerse posteriormente se disuelven en la humedad circundante.
- Se observó la misma tendencia de formación de bicarbonatos, así como de reducción de carbonatos, en los análisis teóricos y experimentales; pero amplia diferencia en las concentraciones esto se debe a que las muestras estuvieron en un grado más elevado de contacto con el dióxido de carbono del aire, en la manipulación de las muestras durante la experimentación como en el momento del pesaje de las muestras.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones generales

- Se determinó experimentalmente las isotermas de sorción de humedad de las sustancias químicas controladas por el CONSEP: carbonato de sodio y carbonato de potasio; para de este modo predecir la humedad de equilibrio de las mencionadas sustancias a diferentes humedades y temperaturas ambientales; cumpliéndose con los objetivos propuestos siendo posible analizar las condiciones ambientales que favorecen a la industria en el momento de almacenar materia prima de carácter higroscópico.
- Se estableció experimentalmente la influencia del dióxido de carbono en la composición del carbonato de sodio y carbonato de potasio, a diferentes humedades y temperaturas ambientales.
- La aplicación del estudio en la presente tesis permitirá establecer rangos de tolerancia en el CONSEP, en cuanto al incremento de masa que sufren el carbonato de sodio y carbonato de potasio, debido a su naturaleza higroscópica.
- Se desarrolló satisfactoriamente la experimentación gracias a la colaboración conjunta del CONSEP y la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, ratificándose que ambas Instituciones tienen interés en desarrollar proyectos que aporten con el manejo adecuado y control de productos químicos específicos en el país.

5.2 Conclusiones experimentales

- Las isothermas de sorción de humedad de las sustancias en mención corresponden al tipo III por su tendencia en forma de J. En el orden de mayor eficacia para el ajuste de los datos experimentales de las isothermas de sorción de humedad de Na_2CO_3 y K_2CO_3 se sugiere los modelos de PELEG, GDW, GAB y BET; siendo el de mejor ajuste el modelo de PELEG.
- El modelo de PELEG describe satisfactoriamente la tendencia de los datos experimentales de humedad relativa de equilibrio, en promedio el coeficiente R^2 fue de 0,9989 y el error relativo medio de 0,8373 % para el carbonato de sodio y para el carbonato de potasio R^2 fue de 0,9998 y el error relativo 0,0162%.
- El efecto de la temperatura sobre las isothermas de sorción de humedad evidencia que las sustancias en mención pueden llegar a ser más higroscópicas y deliquescentes (en el caso del carbonato de potasio), con el incremento de la temperatura.
- El carbonato de potasio a humedades relativas menores al 70%, mantiene su estado granular, a humedades superiores presenta un comportamiento deliquescente.
- El carbonato de sodio anhidro adquirió una molécula de agua de hidratación y se convirtió en carbonato de sodio monohidratado a actividades de agua 0,85 y 0,75 a las temperaturas de 25°C y 35°C respectivamente. A 15°C adquirió una cierta cantidad de humedad (13,9304%) sin llegar a transformarse en el monohidrato.
- El carbonato de potasio se hidrató formándose el $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5 \text{H}_2\text{O}$ a actividades de agua de 0,75, 0,7 y 0,44 a las temperaturas 15, 25 y 35°C respectivamente.
- El carbonato de sodio y carbonato de potasio con un cierto contenido de humedad, reaccionan con el dióxido de carbono del aire, transformándose en bicarbonatos, siendo mayor la transformación conforme se incrementa la temperatura, por tornarse las dos sales más higroscópicas.
- El carbonato de sodio húmedo, a 44% de humedad relativa se transformó a 15°C en bicarbonato de sodio en un porcentaje de 1,47%; mientras que a 35°C se transformó en un 2,37%. El carbonato de potasio húmedo, a 44% de humedad relativa se transformó a 15°C en

bicarbonato de potasio en un porcentaje de 10,90%; mientras que a 35°C se transformó en un 11,67%.

- Las empresas calificadas por el CONSEP, en cumplimiento del artículo 37 Inciso tres de la Ley de Sustancias Estupefacientes y Psicotrópicas: “Los laboratorios y empresas a las cuales se refiere el inciso precedente comunicarán mensualmente y por escrito, a la Secretaría Ejecutiva del CONSEP, los datos actuales, reales y precisos sobre la elaboración, existencia y venta de los preparados antes señalados.”; deben solicitar autorizaciones para realizar ajustes de inventario, respecto a los excedentes de masa , en los reportes mensuales; por medio del conocimiento de la humedad de equilibrio del carbonato de sodio y carbonato de potasio, se podrán realizar cambios en condiciones ambientales en el almacenamiento y manipulación, reduciendo de este modo los excedentes de masa y alteraciones en la composición en dichos productos por efecto de la humedad y el dióxido de carbono en el aire.

5.3 Recomendaciones generales

- Realizar un estudio respecto al tipo de empaque que se puede utilizar para contribuir al tiempo de vida útil en percha del producto a diferentes condiciones ambientales.
- Debido a que no todas las sustancias químicas sólidas poseen las mismas características y comportamiento, no se pueden considerar los modelos matemáticos obtenidos para generalizar a aquellas sustancias químicas de carácter sólido que regula el CONSEP, o se podría considerar otras variables que puedan afectar la ganancia de humedad.
- Las correlaciones matemáticas halladas, pueden ser muy útiles para predecir el comportamiento de estas propiedades con las variables de proceso. Especialmente para predecir la humedad de equilibrio de un producto, ya que esta propiedad no puede ser determinada directamente.

5.4 Recomendaciones al CONSEP y a la Industria

- Para el almacenamiento de sales inorgánicas en estado sólido, se recomienda hacerlo en bodegas de humedad relativa mínima, ya que esta es la principal responsable de la ganancia de masa.
- Establecer el control de humedad y temperatura durante el almacenamiento de productos higroscópicos para determinar las condiciones ambientales que garanticen la conservación de los mismos.
- Mantener calibrados los instrumentos de medición de masa y volumen para productos químicos, y de este modo garantizar el manejo de datos reales y precisos ante entidades de control como el CONSEP.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ECUADOR. CONSEJO NACIONAL DE CONTROL DE SUSTANCIAS ESTUPEFACIENTES Y PSICOTRÓPICAS (CONSEP) [en línea] [Fecha de consulta: 13 Septiembre 2011].
Disponible en: <<http://www.consep.gov.ec/index.php>>
2. Ibid.(Ref1).
3. Ibid. (Ref1).
4. Ibid. (Ref1).
5. NORMA TECNICA COLOMBIANA INCOTEC 1014. Carbonato de sodio para uso industrial. Requisitos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá. 1979. 8 págs.
6. VITRO. [Fecha de consulta: 01 de octubre 2011]. Disponible en:
<http://www.vitro.com/alkali/espanol/DetProd_2546_2547_2548_2549_2550_2556_2.htm>
7. Ibid. (Ref6).
8. Ibid. (Ref6).
9. Diseño de Plantas Químicas [en línea] [Fecha de consulta: 04 de octubre 2011].
Disponible en: <http://www.plantasquimicas.com/Inorganicos/pi42.htm>
10. Proceso Solvay [en línea][Fecha de consulta: 04 de octubre 2011]. Disponible en:<[http:// www.scribd.com/doc/55374090/proceso-Solvay](http://www.scribd.com/doc/55374090/proceso-Solvay)>

11. Ibid.(Ref10).
12. Ibid. (Ref10).
13. Ibid. (Ref10).
14. Ibid. (Ref10).
15. Drogas [en línea][Fecha de consulta: 04 de octubre 2011]. Disponible en:
<<http://carmencortez.net/pdf/drogI.pdf>>
16. Trukos de cocion [en línea][Fecha de consulta: 04 de octubre 2011]. Disponible en:<<http://www.scribd.com/doc/5441602/trukos-de-cocion>>
17. DISTRIBUIDORA DE QUIMICOS INDUSTRIALES S.A. Ficha Técnica Carbonato de Sodio (Soda Ash) [en línea] [fecha de consulta: 09 de octubre 2011]. Disponible en:
<<http://67.25.180.73/~dqisaco/pdf/CARBONATO%20DE%20SODIO%20LIVIANO.pdf>.
18. KIRK, R. “Enciclopedia de la Tecnología Química”. Tomo VI. Primera edición en español. Editorial Unión Tipográfica Hispano-Americana, 1963, p. 364.
19. SURFACTANTES SALAGER, J y FERNANDEZ, A. “Surfactantes” [en línea]. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Química. Mérida Venezuela (2004). [fecha de consulta: 9 de octubre del 2011]. Disponibe en:
< <http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S302.pdf>.>
20. Proceso Solvay [en línea][Fecha de consulta: 04 de octubre 2011]. Disponible en:
<<http://www.scribd.com/doc/55374090/proceso-Solvay>>
21. DISTRIBUIDORA DE QUIMICOS INDUSTRIALES S.A. Ficha Técnica Carbonato de Sodio (Soda Ash) [en línea] [fecha de consulta: 09 de octubre 2011]. Disponible en:
<http://67.25.180.73/~dqisaco/pdf/CARBONATO%20DE%20SODIO%20LIVIANO.pdf>
22. PROQUIMSA S.A. [en línea] [Fecha de consulta: 01 de Marzo 2011].
Disponible en:
< http://www.proquimsaec.com/PDF/HojaSeguridad/HS_Carbonato_de_Potasio.pdf>

23. KIRK, R. Enciclopedia de la Tecnología Química. Primera edición. Editorial Hispanoamericana. Tomo XIII, México, 1963, p. 69
24. Diseño de Plantas Químicas [en línea] [Fecha de consulta: 17 Septiembre 2011].
Disponible en: < <http://www.plantasquimicas.com/Inorganicos/pi43.htm>>
25. Ibid. (Ref24).
26. Ibid. (Ref24).
27. Comisión Interamericana para el Control del Abuso de Drogas (CICAD), Químicos Utilizados en la Producción Ilícita de Drogas. [en línea][Fecha de consulta: 10 Febrero 2011].
Disponible en:
<<http://www.cicad.oas.org/.../esp/.../Espchem%20manual%20revFeb04.doc>>.
28. Oxy Chile [en línea][Fecha de consulta: 19 de Septiembre 2011]. Disponible en:
<http://www.oxychile.cl/rps_oxychile_v56/UsosCarbonatoDePotasio.pdf>
29. Ibid. (Ref28).
30. Ibid. (Ref28).
31. Ibid. (Ref28).
32. Ibid. (Ref28).
33. Ibid. (Ref28).
34. TREYBAL, R. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill. México, p. 725.
35. Ibid. (Ref34).p. 726
36. HOWARD L. R. Introducción a la química. Reverté. Barcelona 1956, p. 151.
37. Ibid. (Ref36).p. 151

38. Ibid. (Ref36).p 153
39. TREYBAL, R. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill. México, p. 728
40. Ibid. (Ref39).p.728
41. Ibid. (Ref39).p.728
42. PERRY, J. Manual del ingeniero químico. Sexta edición. Tomo V. McGraw-Hill. México, p. 20-83.
43. TREYBAL, R. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill. México, p. 728
44. Ibid. (Ref43).p.728
45. Ibid. (Ref43).p.728
46. BADUI, Salvador. Química de los alimentos. Editorial Alhambra S.A., México. 1999, p. 16.
47. PERRY, J. Manual del ingeniero químico. Sexta edición. Tomo V. McGraw-Hill. México, p. 20-83.
48. BADUI, Salvador. Química de los alimentos. Editorial Alhambra S.A., México. 1999, p. 16.
49. MUÑOZ, Ricardo Un modelo para isotermas de equilibrio. Agricultura técnica Volumen N° 51, 1991. [en línea][Fecha de consulta: 09 de noviembre 2011]. Disponible en:
< <http://www.inia.cl/medios/biblioteca/agritec/NR08773.pdf> >
50. POAQUIZA, D. Determinación de isotermas y calor de sorción de humedad de panela granulada producida por las organizaciones paneleras de Ingapi y Pacto. Quito, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial).Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. p. 12

51. TREYBAL, R. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill. México, p. 626.
52. BELL, L. y LABUZA, T. MOISTURE SORPTION Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use. Segunda edición. American Association of Cereal Chemists, inc. USA, 1984. p.12
53. Ibid (Ref52).p.12
54. MARTÍN, J. Adsorción física de gases y vapores por carbones. Universidad de Alicante. Imprime: Imprenta de la Universidad.España. p. 17,18. [en línea][Fecha de consulta: 13 de noviembre 2011]. Disponible en:
<<http://www.publicaciones.ua.es/filespubli/pdf/LD84868093394137107.pdf>.>
55. Ibid. (Ref54).
56. POAQUIZA, D. Determinación de isothermas y calor de sorción de humedad de panela granulada producida por las organizaciones paneleras de Ingapi y Pacto. Quito, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial).Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. p.12.
57. MARTÍN, J. Adsorción física de gases y vapores por carbones. Universidad de Alicante. Imprime: Imprenta de la Universidad.España. p. 18. [en línea][Fecha de consulta: 13 de noviembre 2011]. Disponible en:
<<http://www.publicaciones.ua.es/filespubli/pdf/LD84868093394137107.pdf>.>
58. POAQUIZA, D. Determinación de isothermas y calor de sorción de humedad de panela granulada producida por las organizaciones paneleras de Ingapi y Pacto. Quito, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial).Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. p.20.
59. Ibid. (Ref58). p. 21
60. PRIETO, F.GORDILLO, A. Evaluación de las isothermas de sorción en cereales para desayuno. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. [Fecha de consulta: 20 de febrero del 2012]. Disponible en:
<<http://www.exeedu.com/publishing.cl/av...ing/.../13-ACI1087-11-full.pdf>>

61. POAQUIZA, D. Determinación de isothermas y calor de sorción de humedad de panela granulada producida por las organizaciones paneleras de Ingapi y Pacto. Quito, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial).Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. p.30.
62. Ibid. (Ref61). p. 17
63. Ibid. .(Ref61). p. 17
64. Ibid.(Ref61). p. 18
65. Ibid. (Ref61). p. 18
66. POAQUIZA, D. Determinación de isothermas y calor de sorción de humedad de panela granulada producida por las organizaciones paneleras de Ingapi y Pacto. Quito, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial).Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. p.30.
67. GARCÍA. R. Caracterización Textural de Adsorbentes. Universidad de Concepción, Chile. p. 26.
68. BELL, L. y LABUZA, MOISTURE SORPTION Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use. Segunda edición. American Association of Cereal Chemists, inc. USA, 1984. p.59
69. COLOMA. J. Determinación de permeabilidad máxima permitida para el empaque de café industrializado. Trabajo de grado (Ingeniero de Alimentos).Escuela Superior Politécnica del Litoral . Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil, 2005 p. 15[en línea][Fecha de consulta: 13 de diciembre 2011]. Disponible en: <<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/2329/1/4540.pdf>>
70. TORREALBA, M. Determinación de isothermas de sorción de humedad en harina precocida de plátano verde. Venezuela 2001. [en línea][Fecha de consulta: 13 de diciembre 2011]. Disponible en:
http://www.biblio.colpos.mx:8080/.../Perez_Prado_JA_MT_Agroindustria>
71. PRIETO, F.GORDILLO, A. Evaluación de las isothermas de sorción en cereales para desayuno. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. [Fecha de consulta: 20 de febrero del 2012]. Disponible en:

<<http://www.exceedu.com/publishing.cl/av...ing/.../13-ACI1087-11-full.pdf>>

72. POAQUIZA, D. Determinación de isothermas y calor de sorción de humedad de panela granulada producida por las organizaciones paneleras de Ingapi y Pacto. Quito, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Agroindustrial).Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. p.47.
73. Zug, J., “Isothermas de sorción de Tres Etapas y Modelos de Sorción Restringida”. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 2002. P. 2[en línea][Fecha de consulta: 20 de febrero 2012]. Disponible en:
< [http:// http://materias.fi.uba.ar/6307/Zug-MonografiaFQE-v2003.PDF](http://materias.fi.uba.ar/6307/Zug-MonografiaFQE-v2003.PDF)>
74. Ibid.(Ref72). p. 31
75. Ibid.(Ref73).
76. Ibid.(Ref72). p. 33
77. SINIJA, V. MISHRA, H. “MOISTURE SORPTION ISOTHERMS AND HEAT OF SORPTION OF INSTANT (SOLUBLE) GREEN TEA POWER AND GREEN TEA GRANULES” Journal of Food Engineering.2007. p. 494-500
.
78. Ibid.(Ref72). p. 34
79. Ibid.(Ref72). p. 35
80. MANAHAN, S. Introducción a la Química Ambiental. Primera edición. Editorial Reverté. España. 2007. p. 39
81. Ibid.(Ref80). p. 39
82. KRESHKOV. A. YAROSLÁVTSEV. A. “Curso de química analítica análisis cuantitativo. Mir Moscú. 1985.p. 235
83. Ibid.(Ref82). p. 236
84. Ibid.(Ref82). p. 242
85. MANAHAN, S. Introducción a la Química Ambiental. Primera edición. Editorial Reverté. España. 2007. p. 39

86. Wikipedia La Ley de Henry [en línea][Fecha de consulta: 01 de octubre 2011].
Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Henry>
87. LABUZA T., et al. CURRENT PROTOCOLS IN FOOD ANALYTICAL CHEMISTRY.[en línea][Fecha de consulta: 08 junio2011]. Disponible en:
<<http://www.nshtvn.org/ebook/molbio/.../faa0203.pdf>>
88. BELL, L. y LABUZA, MOISTURE SORPTION Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use. Segunda edición. American Association of Cereal Chemists, inc. USA, 1984. p.43
89. Ibid.(Ref 88). p. 44

BIBLIOGRAFÍA

BADUI, Salvador. Química de los alimentos. Editorial Alhambra S.A., México. 1999, 736 p.

BELL, L. y LABUZA, T. MOISTURE SORPTION Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use. Segunda edición. American Association of Cereal Chemists, inc. USA, 1984. 122 p.

CIRAD-AMIS-PPA, (2000), “Procédure Opérationnelle: Détermination d’isothermes de sorption. 11 p.

COLOMA, José. Determinación de permeabilidad máxima permitida para el empaque de café industrializado. Trabajo de grado .Ingeniero de Alimentos.Escuela Superior Politécnica del Litoral .. Guayaquil, 2005 110 p.[en línea][Fecha de consulta: 13 de diciembre 2011]. Disponible en: <<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/2329/1/4540.pdf>>

CONSEP. Gobierno Nacional de la República de Ecuador. [en línea]: Base de datos de Institución Estatal. [fecha de consulta: 13 de Septiembre del 2011]. Disponible en: <http://www.consep.gob.ec/index.php?cod_categoria=4&cod_sub=39>

INEN. [en línea]: Base de datos de Institución Estatal. [fecha de consulta: 7 de Noviembre del 2011]. Disponible en: <http://www.inen.gov.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=49&Itemid=62>

MARTÍN, J. Adsorción física de gases y vapores por carbones. Universidad de Alicante. Imprime: Imprenta de la Universidad.España. P. 17,18. [en línea][Fecha de consulta: 13 de noviembre 2011]. Disponible en: <<http://www.publicaciones.ua.es/filespubli/pdf/LD84868093394137107.pdf>>

MUÑOZ, Ricardo Un modelo para isotermas de equilibrio. Agricultura técnica Volumen N° 51, 1991. [en línea][Fecha de consulta: 09 de noviembre 2011]. Disponible en: < [http:// www.inia.cl/medios/biblioteca/agritec/NR08773.pdf](http://www.inia.cl/medios/biblioteca/agritec/NR08773.pdf)>

KRESHKOV. A. YAROSLÁVTSEV. A. “Curso de química analítica análisis cuantitativo. Mir Moscú. 1985.336 p.

KIRK, R. “Enciclopedia de la Tecnología Química”. Primera edición en español. Editorial Unión Tipográfica Hispano-Americana, México, 1963, 1494 p.

ORTIZ Nelly. Diseño del Sistema de Fiscalización para el CONSEP de Químicos y Reactivos utilizados en los Campos Petroleros de Petroproducción. Trabajo de Grado. Ingeniero Químico. Universidad Central del Ecuador. Escuela de Ingeniería Química. Quito. 2009.

POAQUIZA, Delia. Determinación de isothermas y calor de sorción de humedad de panela granulada producida por las organizaciones paneleras de Ingapi y Pacto. Trabajo de grado. Ingeniero Agroindustrial. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial. Quito, 2008.167 p.

TAPIA, Sara. Manual de procedimientos para el uso de sustancias controladas por el CONSEP en Marbelize S.A. Trabajo de Grado. Ingeniero Químico. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Escuela de Ingeniería Química. Quito. 2011.

TORREALBA, M. Determinación de isothermas de sorción de humedad en harina precocida de plátano verde. Venezuela 2001. [en línea][Fecha de consulta: 13 de diciembre 2011] 115. p Disponible en:

http://www.biblio.colpos.mx:8080/.../Perez_Prado_JA_MT_Agroindustria>

TREYBAL, R. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill. México, 862 p.

Zug, J., “Isothermas de sorción de Tres Etapas y Modelos de Sorción Restringida”. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 2002. P. 2[en línea][Fecha de consulta: 20 de febrero 2012]. Disponible en: < [http:// http://materias.fi.uba.ar/6307/Zug-MonografiaFQE-v2003.PDF](http://materias.fi.uba.ar/6307/Zug-MonografiaFQE-v2003.PDF)

ANEXOS

ANEXO A

DATOS DE HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA MENSUAL DE LOS AÑOS 2000 AL 2010 EN ESTACIONES METEREOLÓGICAS DE QUITO (IÑAQUITO) Y GUAYAQUIL (U. ESTATAL)

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA
UNIDAD ATENCION AL USUARIO

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL (%)

S E R I E S M E N S U A L E S D E D A T O S M E T E O R O L O G I C O S															
NOMBRE: QUITO INAMHI-INNAQUITO							CODIGO: M024								
PERIODO: 2000 - 2010 LATITUD:				0	10	0 S	LONGITUD:			78	29	0 W ELEVACION:			2789
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA	
2000	77	76	77	78	76	73	63	56	68	62	67	69	842	70	
2001	71	66	74	68	71	59	60	49	66	62	69	75	790	65	
2002	69	71	74	77	67	59	58	54	59	67	70	74	799	66	
2003	66	68	70	73	69	68	57		62	71	74	71			
2004	69	67	68	73	71	57	61	51	61	73	74	73	798	66	
2005	70	74	77	72	68	66	58	59	59	73	71	77	824	68	
2006	74	75	76	76	70	68	57	57	60	69	78	75	835	69	
2007	70	67	76	80	77	69	64	65	59	77	74	77	855	71	
2008	76	78	76	75	76	69	64	66	64	70	74	76	864	72	
2009	76	74	74	72		67	59	61	54	67	68	72			
2010		66	66	77		73	74	68	70	73	84	83			
media	71	71	73	74	71	66	61	58	62	69	73	74	827	68	
minima	66	66	66	68	67	57	57	49	54	62	67	69		49	
maxima	77	78	77	80	77	73	74	68	70	77	84	83		84	

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA
UNIDAD ATENCION AL USUARIO

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL (%)

S E R I E S M E N S U A L E S D E D A T O S M E T E O R O L O G I C O S														
NOMBRE: GUAYAQUIL U. ESTATAL (RADIO SONDA)					CODIGO: MA2V									
PERIODO: 2000 - 2010		LATITUD:		2	12	0 5	LONGITUD:		79	53	0 W ELEVACION:		6	
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
2000	68	77	77	76	77	76	76	73	72	71	69	68	880	73
2001	76	79	81	79	77	76	77	75	73			71		
2002	70	82	82	80	75	75	76	74	73	74	73	72	906	75
2003	73	79	76	71		75	74		73	73	73	69		
2004	66	75		76	73	73	75		72	72	71	65		
2005	66	74	76	77	73	76	74	74	72	73	72	70	877	73
2006	69	83	77	70	71	75	75	73	73	72	71	68	877	73
2007	76	74	77	74	73	76	73	72	70	73	70	68	876	73
2008	84	81	81	74	76	75	75	74	72	72	69	66	899	74
2009	75	80	76	68	69	72	73	73	71	71	69	68	865	72
2010	76	80	78	76	75	75	75	75	75	71		75		
media	72	78	78	74	73	74	74	73	72	72	70	69	885	73
minima	66	74	76	68	69	72	73	72	70	71	69	65		65
maxima	84	83	82	80	77	76	77	75	75	74	73	75		84

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA
UNIDAD ATENCION AL USUARIO

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C)

S E R I E S M E N S U A L E S D E D A T O S M E T E O R O L O G I C O S														
NOMBRE: QUITO INAMHI-INNAQUITO					CODIGO: M024									
PERIODO: 2000 - 2010		LATITUD:		0	10	0 5	LONGITUD:		78	29	0 W ELEVACION:		2789	
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
2000	13.6	13.4	13.9	14.1	14.1	14.6	14.6	15.3	14.2	15.5	14.6	14.4	172.3	14.3
2001	13.8	14.9	14.2	15.2	15.1	15.4	15.2	16.3	14.8	16.2	15.1	15.3	181.5	15.1
2002	15.1	14.9	15.0	14.3	15.5	15.2	15.9	16.0	16.0	15.3	14.9	15.2	183.3	15.2
2003	15.9	16.0	15.0	15.1	15.7	14.9	15.6		15.8	15.4	15.0	14.8		
2004	15.1	15.0	15.9	15.0	15.5	15.9	15.1	16.2	15.5	14.9	15.0	14.8	183.9	15.3
2005	15.2	15.5	15.0	15.8	15.7	16.0	16.2	16.1	16.4	14.6	14.7	13.9	185.1	15.4
2006	14.6	15.1	14.5	14.7	15.5	15.1	16.1	16.2	16.0	15.3	14.5	14.9	182.5	15.2
2007	16.0	15.4	15.0	14.8	15.3	15.3	15.6	15.2	16.1	14.5	14.9	14.0	182.1	15.1
2008	14.6	13.6	13.7	14.3	14.2	14.9	14.8	14.6	15.5	14.5	14.3	14.4	173.4	14.4
2009	14.5	14.5		15.2		15.5	16.1	16.3	17.0	16.0	15.9	16.0		
2010		17.0	16.8	15.7		14.9	14.6	14.9	15.1	15.2	13.4	14.0		
media	14.8	15.0	14.9	14.9	15.1	15.2	15.4	15.7	15.6	15.2	14.7	14.7	181.6	15.1
minima	13.6	13.4	13.7	14.1	14.1	14.6	14.6	14.6	14.2	14.5	13.4	13.9		13.4
maxima	16.0	17.0	16.8	15.8	15.7	16.0	16.2	16.3	17.0	16.2	15.9	16.0		17.0

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA
UNIDAD ATENCION AL USUARIO

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (gc)

SERIES MENSUALES DE DATOS METEOROLOGICOS

NOMBRE: GUAYAQUIL U.ESTATAL (RADIO SONDA)


CODIGO: MAZV

PERIODO: 2000 - 2010 LATITUD: 2 12 0 S LONGITUD: 79 53 0 W ELEVACION: 6

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
2000	26.8	26.5	26.7	27.2	26.1	24.8	23.9	24.6	24.9	25.7	25.6	26.9	309.7	25.8
2001	26.7	26.8	27.1	27.2	25.9	24.1	23.9	23.9	24.4			26.3		
2002	27.7	26.3	27.0	27.2	27.5	25.5	24.8	24.4	25.1	25.4	26.1	27.0	314.0	26.1
2003	27.6	27.0	27.8	28.2		25.4	24.8		24.6	25.6	25.7	27.5		
2004	28.3	27.6		27.3	26.9	25.3	24.4		25.6	25.7	25.6	27.7		
2005	28.7	27.6	27.5	28.0	26.4	25.0	24.8	24.2	24.8	24.4	25.4	26.3	313.1	26.0
2006	27.6	26.6	27.7	27.9	26.9	25.2	24.5	25.5	25.7	25.9	25.9	27.5	316.9	26.4
2007	27.4	27.8	27.4	27.9	27.1	25.6	25.2	24.3	24.7	24.2	25.2	26.2	313.0	26.0
2008	25.1	26.1	26.8	27.9	26.6	25.8	25.6	25.4	25.6	25.3	25.7	26.7	312.6	26.0
2009	26.7	26.5	27.1	28.0	27.5	26.1	25.6	25.3	25.4	25.3	25.8	27.4	316.7	26.3
2010	27.4	27.5	27.9	28.2	27.4	25.7	25.5	24.7	25.0	25.5		25.8		
media	27.2	26.9	27.3	27.7	26.8	25.3	24.8	24.7	25.0	25.3	25.6	26.8	313.7	26.1
minima	25.1	26.1	26.7	27.2	25.9	24.1	23.9	23.9	24.4	24.2	25.2	25.8		23.9
maxima	28.7	27.8	27.9	28.2	27.5	26.1	25.6	25.5	25.7	25.9	26.1	27.7		28.7

ANEXO B

HOJA TÉCNICA DEL CARBONATO DE SODIO PROPORCIONADA POR LA EMPRESA PROCESOS & COLORES

 SOLVAY	SOLVAY CHEMICALS INTERNATIONAL	CERTIFICATE OF COMPLIANCE <small>Insp Doc Type 2.1 EN 10204:2004</small> SPE - C05-08.11 - Date 12-2010 - Ed.7
Customer PROCESOS & COLORES QUITO EQUATEUR		Certificate recipient
Delivery note 82560003 000010 Shipping date 01.02.2011 Packaging Packed	Order 2046104 000010 Customer ref. 13458 Ship name CSAV RIO TOLTEN	
SODASOLVAY L - SODIUM CARBONATE LIGHT		
Industrial origin DOMBASLE-SUR-MEURTHE		
Batchnr DESFEB110 / Quantity 19.000,000 KG		
Characteristics	Units	Value
Na ₂ CO ₃ (*)	%	Conform
NaCl	%	Conform
Na ₂ SO ₄	%	Conform
CaO	ppm	Conform
MgO	ppm	Conform
Fe ₂ O ₃	ppm	Conform
Loss on drying (*)	%	Conform
Free flowing density	kg/dm ³	Conform
PSAE packed finished product	kg/dm ³	Conform
> 1,000 mm	%	Conform
> 0,250 mm	%	Conform
< 0,125 mm	%	Conform
< 0,063 mm	%	Conform
Specification > = 99,0 < = 0,20 < = 0,030 < = 100 < = 50 < = 20 < = 0,50 0,500 - 0,625 0,450 - 0,625 < = 5		
(*) Ex works or after drying (2 hrs at 250°C)		
Container (s) CRLU7251230		
This Certificate was automatically produced and is valid without signature		

ANEXO C

HOJA TÉCNICA DEL CARBONATO DE POTASIO PROPORCIONADA POR LA EMPRESA QUIMICA SUPERIOR UNICHEM

18.3595/10

Certificate of Analysis
POTASSIUM CARBONATE GLASS 25kg BAG

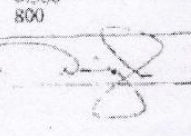
PROQUIMSA S. A.
EQUADOR
EQUADOR

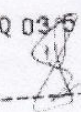
Detailed Order Information	
Date	02/03/2010
Purchase order Item/date	1034939/82612569
Delivery Item/date	0082510386
Order Item/date	0002115300
Customer Number	A50631383
Container Number	

ARMAND PRODUCT CODE 3642300

Batch MM9341 1

Characteristic	Unit	Value	Specifications	
			Min.	Max.
Total Alkalinity (as K ₂ CO ₃)	Wt %	99.99	99.50	
KHCO ₃	Wt %	0.00		
KOH	Wt %	0.154		0.200
Fe (wt %)	Wt %	0.000019		0.000200
H ₂ O (Moisture or LOD)	WT%	0.306		0.500
Number of Packages		800		

ISSUED BY 

No. DE LOTE PROQUIMSA
PQ 03595


ANEXO D

FICHAS DE SEGURIDAD DEL CARBONATO DE SODIO ANHIDRO Y CARBONATO DE POTASIO ANHIDRO

Nombre del Producto: **CARBONATO DE SODIO ANHIDRO**

Fecha de Revisión: Junio de 2009



GRUPO TRANSMERQUIM

SECCION 1 : IDENTIFICACION DEL PRODUCTO Y DE LA COMPAÑÍA

PRODUCTO Nombre Químico: SODIO CARBONATO
ANHIDRO -Na₂CO₃ Familia Química: Número CAS: 497-19-8
Sinónimos: Soda Solvay



COMPAÑÍA: Grupo Transmerquím

Teléfonos de Emergencia

SALUD	2
INFLAMABILIDAD	0
REACTIVIDAD	0
ESPECÍFICO	

México : Interior: 01800 00 214 00 D.F. (55) 55591588 Guatemala: (502) 66285858 El Salvador: (503) 22517700 Honduras: (504) 5568403 Nicaragua: (505) 22690361 -Toxicología MINSA: (505) 22897395 Costa Rica: (506) 25370010 Panamá: (507) 5126182 Colombia: (01800 916012 Perú: 080 050847 -(511) 4416365 Ecuador: 1800 593005 Venezuela: 800 1005012

SECCION 2 : COMPOSICION / INFORMACION SOBRE LOS INGREDIENTES

SODIO CARBONATO ANHIDRO CAS: 497-19-8 99%

SECCION 3 : IDENTIFICACION DE PELIGROS

Irrita los ojos.

SECCION 4 : MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Indicaciones Generales: En caso de pérdida del conocimiento nunca dar nada de beber a la víctima. ni provocar el vómito.

Precauciones Individuales:

No inhalar el polvo.

Protección del medio ambiente:

-

Métodos de recogida/limpieza: Recoger en seco y depositar en contenedores de residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con abundante agua.

SECCION 7: MANEJO Y ALMACENAMIENTO

Manipulación: Sin indicaciones particulares.

Almacenamiento: Mantenga los recipientes bien cerrados en una zona seca a temperatura ambiente. No almacenar en recipientes de metales ligeros.

SECCION 8: CONTROLES DE EXPOSICION Y PROTECCION PERSONAL

Medidas técnicas de protección:

-

Control límite de exposición:

-

Protección de los ojos:

Usar gafas protectoras apropiadas.

Protección de las manos:

Usar guantes apropiados.

Protección respiratoria:

En caso de formarse polvo, usar equipo

respiratorio adecuado.

Medidas de higiene particulares:

Retirar las ropas contaminadas. Usar ropa de trabajo adecuada, lavarse las manos antes de las pausas y al finalizar el trabajo.

Exposición al medio ambiente:

Cumplir con la legislación local vigente sobre protección del medio ambiente. El proveedor de los medios de protección debe especificar el tipo de protección que debe usarse para la manipulación del producto, indicando el tipo de material y, cuando proceda, el tiempo de penetración de dicho material, en relación con la cantidad y la duración de la exposición.

Fichas Internacionales de Seguridad Química

CARBONATO DE POTASIO (ANHIDRO)		ICSC: 1588
		Abril 2005
Ácido carbónico, sal dipotásica Carbonato dipotásico		
CAS:	584-08-7	K ₂ CO ₃
RTECS:	TS7750000	Masa molecular: 138,2
CE / EINECS:	209-529-3	

TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	No combustible.		En caso de incendio en el entorno: están permitidos todos los agentes extintores.
EXPLOSIÓN			

EXPOSICIÓN		¡EVITAR LA DISPERSION DEL POLVO!	
Inhalación	Dolor de garganta. Tos.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo.
Piel	Enrojecimiento. Dolor.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar la piel con agua abundante o ducharse.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Sensación de quemazón en garganta y tórax.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Dar a beber agua abundante. Proporcionar asistencia médica.

DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO
Protección personal adicional: respirador de filtro P2 contra partículas nocivas. Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente. Eliminar el residuo con agua abundante.	
RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO
	Mantener en lugar seco. Separado de ácidos fuertes.

IPCS International Programme on Chemical Safety    	 
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005	

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

Fichas Internacionales de Seguridad Química

CARBONATO DE POTASIO (ANHIDRO)		ICSC: 1588
DATOS IMPORTANTES		
<p>ESTADO FÍSICO; ASPECTO: Cristales higroscópicos incoloros o polvo higroscópico blanco.</p> <p>PELIGROS QUÍMICOS: La disolución en agua es moderadamente básica. Reacciona violentamente con ácidos y con trifluoruro de cloro. Reacciona con metales en polvo.</p> <p>LÍMITES DE EXPOSICIÓN: TLV no establecido. MAK no establecido.</p>	<p>VÍAS DE EXPOSICIÓN: La sustancia se puede absorber por ingestión.</p> <p>RIESGO DE INHALACIÓN: Puede alcanzarse rápidamente una concentración nociva de partículas suspendidas en el aire cuando se dispersa.</p> <p>EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN: La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio.</p>	
PROPIEDADES FÍSICAS		
<p>Punto de fusión: 891 °C Densidad: 2,29 g/cm³ Solubilidad en agua, g/100 ml a 20 °C: 112</p>		
DATOS AMBIENTALES		
NOTAS		
INFORMACIÓN ADICIONAL		
Nota legal	<p>Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.</p>	
© IPCS, CE 2005		

ANEXO E

NORMA INEN 1887 DETERMINACIÓN HUMEDAD CARBONATO DE SODIO

CDU: 661.833.622
CIIU: 3511



QU 03.01-319

Norma Ecuatoriana Obligatoria	CARBONATO DE SODIO PARA USO INDUSTRIAL DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	INEN 1 887 1992-03
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN, Casilla 3999 - Baquerizo 454 y Ave. 6 de Diciembre - Quito-Ecuador - Prohibida la reproducción</p>		
	<p style="text-align: center;">1. OBJETO</p> <p>1.1 Esta norma describe el método para determinar el contenido de humedad en el carbonato de sodio para uso industrial.</p> <p style="text-align: center;">2. RESUMEN</p> <p>2.1 El método consiste en determinar la masa de una muestra antes y después de haber sido sometida a un procedimiento adecuado, mediante el cual pierde su contenido de agua. La pérdida de masa se expresa en porcentaje.</p> <p style="text-align: center;">3. EQUIPO</p> <p>3.1 Balanza analítica, sensibilidad 0,001 g</p> <p>3.2 Estufa de temperatura regulable $\pm 2^{\circ}\text{C}$</p> <p>3.3 Desecador</p> <p>3.4 Vidrio de reloj.</p> <p>3.5 Material usual de laboratorio</p> <p>3.6 Equipo de protección personal adecuado para laboratorio</p> <p style="text-align: center;">4. PROCEDIMIENTO</p> <p>4.1 La determinación efectuar por duplicado</p> <p>4.2 Pesar $5 \pm 0,001$ g de muestra, en un vidrio de reloj, previamente tarado. Anotar la masa (m).</p> <p>4.3 Llevar el vidrio reloj y su contenido a una estufa, mantener la temperatura de $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 2 h.</p> <p>4.4 Enfriar en un desecador y pesar.</p> <p>4.5 Repetir la operación hasta obtener masa constante. Anotar la masa (m_1).</p> <p style="text-align: right;"><i>(Continúa)</i></p> <p>DESCRIPTORES: Carbonato de sodio, análisis químico, determinación del contenido de humedad.</p>	

5. CALCULO

5.1 El contenido de humedad, se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$\% \text{ H} = \frac{m - m_1}{m} \times 100$$

En donde:

% H = contenido de humedad, porcentaje en masa

m = masa inicial de la muestra, en gramos

m₁ = masa final de la muestra, en gramos.

6. ERRORES DE METODO

6.1 La diferencia entre los resultados de una determinación efectuada por duplicado no debe exceder del 5% del valor promedio, en caso contrario, debe repetirse la determinación.

7. INFORME DE RESULTADOS

7.1 Como resultado final, debe reportarse la media aritmética de los resultados de la determinación.

7.2 En el informe de resultados debe indicarse el método usado y el resultado obtenido, debe mencionarse, además, cualquier condición no especificada en esta norma o considerada como opcional, así como cualquier circunstancia que pueda haber influido sobre el resultado.

7.3 Debe incluirse todos los detalles para la completa identificación de la muestra.

(Continúa)

ANEXO F

ACTIVIDADES DE AGUA DE SOLUCIONES SALINAS SATURADAS A DIFERENTES TEMPERATURAS

Tabla F.1 Actividades de agua de soluciones acuosas

T °C	Actividad de agua			
	Hidróxido de sodio (NaOH)	Cloruro de litio (LiCl)	Carbonato de potasio (K ₂ CO ₃)	Yoduro de potasio (KI)
10		0,113±0,004	0,431±0,004	0,721±0,003
15	0,096±0,028	0,113±0,004	0,432±0,003	0,710±0,003
20	0,089±0,024	0,113±0,003	0,432±0,003	0,699±0,003
25	0,082±0,021	0,113±0,003	0,432±0,004	0,689±0,002
30	0,076±0,017	0,113±0,002	0,432±0,005	0,679±0,002
35	0,069±0,015	0,113±0,002		0,670±0,002
40	0,062±0,012	0,112±0,002		0,661±0,002

Fuente: Bell & Labuza, 2000

Tabla F.2 Actividades de agua de soluciones acuosas

T °C	Actividad de agua		
	Cloruro de sodio (NaCl)	Cloruro de potasio (KCl)	Cloruro de bario (BaCl ₂)
10	0,757±0,002	0,868±0,004	
15	0,756±0,002	0,859±0,003	
20	0,755±0,001	0,851±0,003	
25	0,753±0,001	0,843±0,003	0,9019±0,001
30	0,751±0,001	0,836±0,003	
35	0,749±0,001	0,830±0,003	
40	0,747±0,001	0,823±0,003	

ANEXO G

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE ACTIVIDAD DE AGUA



Figura G.1. Soluciones salinas saturadas previamente preparadas



Figura G.2. Toma de muestra



Figura G.3. Toma de muestra

Colocar las muestras cubriendo un tercio de la capacidad de los porta muestras plásticos del equipo medidor de actividad de agua AQUALAB modelo Pawkit,

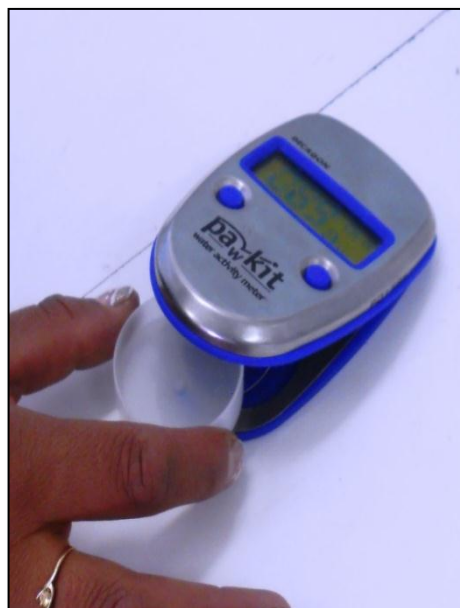


Figura G.4. Medición de actividad de agua Figura G.5. Medición de actividad de agua

Colocar el porta muestra en el medidor, cerrar y pulsar el botón izquierdo. Se realiza la lectura directa del valor de la actividad de agua al registrarse un sonido luego de cinco minutos de espera.



Figura G.6. Lectura de la actividad de agua Figura G.7. Lectura de la actividad de agua

ANEXO H

RELACIÓN DE ÁREA Y VOLUMEN DE LAS MUESTRAS Y EL RECIPIENTE HERMÉTICO

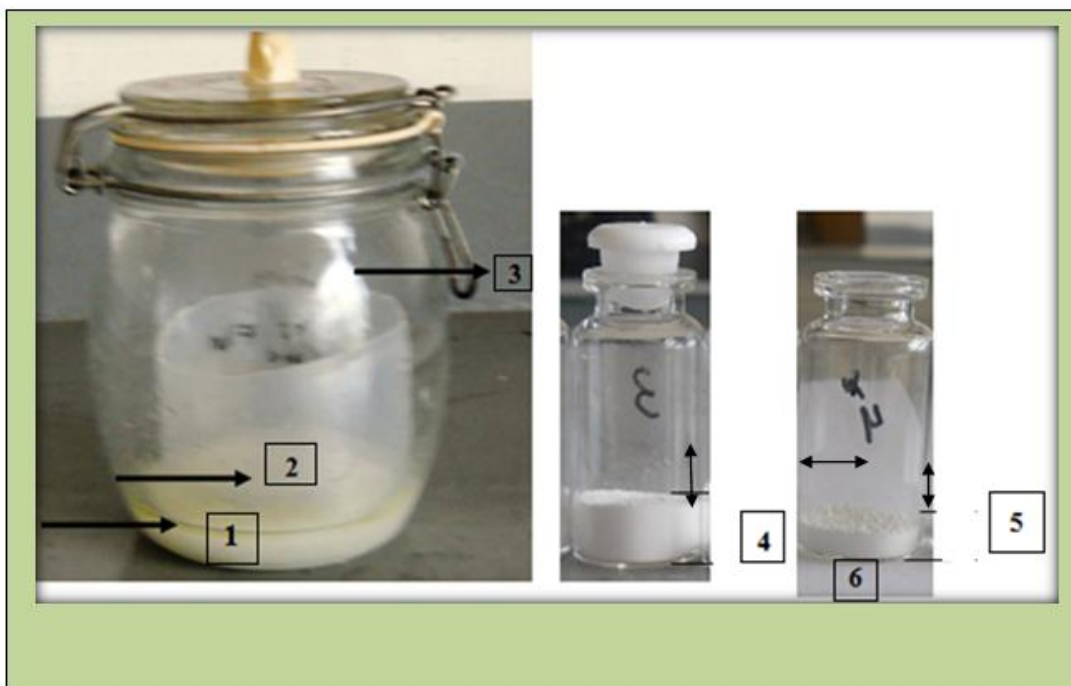


Figura G.8 Recipiente hermético para el desarrollo experimental

Medidas de recipiente hermético y tubos viales:

- (1) Altura solución saturada (H_1): 0,5 cm; altura sal inorgánica(H_2): 2cm
- (2) Radio de recipiente de cristal (R): 5 cm
- (3) Volumen total recipiente: 1000 cm^3
- (4) Radio vial (r): 0,9 cm

RELACIÓN DE ÁREAS

- Área sal contenida en vial: $2\pi R^2 + 2\pi Rh$

a) RELACIÓN DE ÁREAS

- **Cálculo del área de contacto del carbonato de sodio y carbonato de potasio contenido en un vial :**

Considerando el área de contacto entre la sal contenida en el vial y el aire contenido en la cámara:

$$\text{Área base} = \text{área circular}(\pi r^2)$$

Donde:

r= radio del vial

$$\text{Área Na}_2\text{CO}_3 \text{ contenido en vial: } \pi(0,9\text{cm})^2 = \mathbf{2,5447\text{cm}^2}$$

$$\text{Área K}_2\text{CO}_3 \text{ contenido en vial: } \pi(0,9\text{cm})^2 = \mathbf{2,5447\text{cm}^2}$$

- **Área muestra contenida en recipiente hermético:**

viales muestra Na_2CO_3 + # viales muestra K_2CO_3

$$\text{Área muestra contenida en recipiente hermético: } (3 * 2,5447 + 3 * 2,5447)\text{cm}^2$$

$$\text{Área muestra contenida en recipiente hermético: } \mathbf{15,2682\text{cm}^2}$$

- **Área solución saturada en recipiente hermético:**

Considerando el área de un cilindro recto:

$$A = 2\pi R^2 + 2\pi RH$$

Donde:

R= radio del recipiente hermético

H₁= altura de la solución saturada

$$A = 2\pi(5\text{cm})^2 + 2\pi * 5\text{cm} * 0,5\text{cm} = \mathbf{172,7876\text{cm}^2}$$

- **Relación de áreas :**

$$\text{Relación de áreas} = \frac{\text{área muestra}}{\text{área solución saturada}}$$

$$\frac{15,2682 \text{ cm}^2}{172,7876 \text{ cm}^2} = \mathbf{0,0884}$$

- **Relación área estandarizada:**

$$\text{Relación de áreas} = \frac{1}{10} = 0,1$$

b) RELACIÓN DE VOLUMENES

Considerando el volumen de un cilindro recto:

$$V = \pi r^2 h$$

- **Volumen sal contenida en vial:**

$$\text{Volumen Na}_2\text{CO}_3 \text{ contenido en vial: } \pi(0,9\text{cm})^2 * 0,8\text{cm} = \mathbf{2,0358\text{cm}^3}$$

$$\text{Volumen K}_2\text{CO}_3 \text{ contenido en vial: } \pi(0,9\text{cm})^2 * 0,4\text{cm} = \mathbf{1,0179\text{cm}^3}$$

- **Volumen muestra contenida en recipiente hermético:**

viales muestra Na_2CO_3 + # viales muestra K_2CO_3

Volumen muestra contenida en recipiente hermético:

$$(3 * 2,0358 + 3 * 1,0179)\text{cm}^3$$

$$\text{Volumen muestra contenida en recipiente hermético: } \mathbf{9,1611 \text{ cm}^3}$$

- **Volumen espacio de aire en recipiente hermético:**

V espacio = Capacidad total – volumen de solución saturada

$$1000 \text{ cm}^3 - \pi * (5\text{cm})^2 * 2,5\text{cm} = \mathbf{803,6505 \text{ cm}^3}$$

- **Relación volumen muestra contenida en recipiente /volumen recipiente:**

$$\frac{9,1611 \text{ cm}^3}{803,6505 \text{ cm}^3} = \mathbf{0,0114}$$

ANEXO J

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE ISOTERMAS DE SORCIÓN DE HUMEDAD

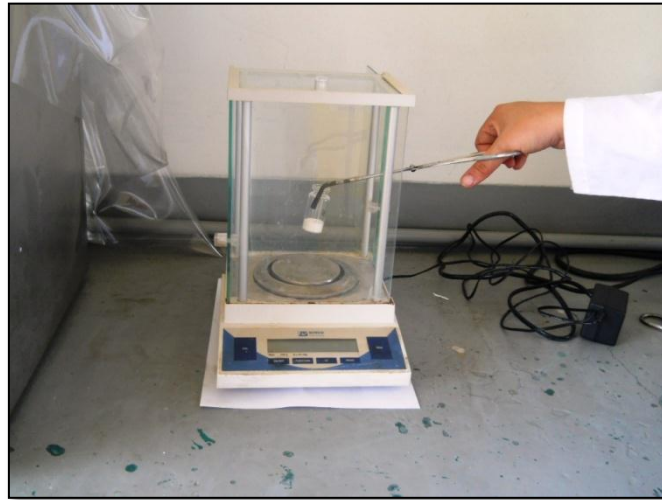


Figura J.1. Pesaje de muestras



Figura J.2. Almacenamiento frascos herméticos



Figura J.3. Pesaje de viales con muestra al final del proceso



**Figura J.4. Muestras de carbonato de sodio y de potasio
Sometidas a las condiciones de la experimentación**

ANEXO K

RESULTADOS DPEC DETERMINACIÓN DE CARBONATOS Y BICARBONATOS CARBONATO DE SODIO



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-04-A-1
Fecha: 2011-10-10

Referencia: OT: 11-10-04-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Sólidas
Identificación de la muestra: Carbonato de Sodio (03-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 03-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-04-A-1
Fecha de realización de ensayos: 03-10-2011/04-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,9289
Bicarbonato de Sodio	g/g	Método Interno	0,0081

Condiciones Ambientales.- Humedad 44%; Temperatura: 20,6°C

Realizado Por: MENR

Revisado Por:

Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:

Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@lquce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 1 de 2



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-2
Fecha: 2011-10-10

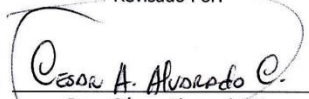
Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 2 (06-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-2
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,024
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,737

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

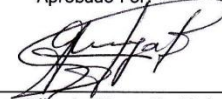
Realizado Por: MFNR

Revisado Por:


Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iuce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 2 de 12



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-3
Fecha: 2011-10-10

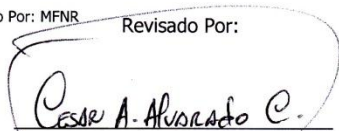
Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 3 (06-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-3
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,029
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,720

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

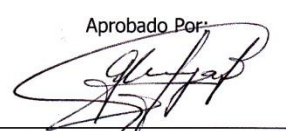
Realizado Por: MFNR

Revisado Por:


Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iuce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 3 de 12



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-4
Fecha: 2011-10-10

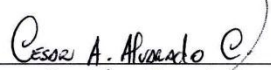
Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 4 (06-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-4
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,038
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,674

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

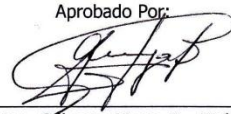
Realizado Por: MFNR

Revisado Por:


Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iuce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 4 de 12



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-5
Fecha: 2011-10-10

Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 5 (06-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-5
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,032
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,711

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

Realizado Por: MFNR

Revisado Por:

Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:

Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iquce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 5 de 12



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-6
Fecha: 2011-10-10

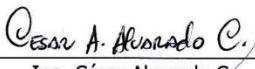
Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 6 (06-10-2011)
Descripción de la muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-6
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,044
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,667

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

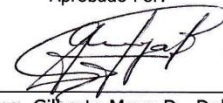
Realizado Por: MFNR

Revisado Por:


Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iquce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 6 de 12

CARBONATO DE POTASIO



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS AGUAS

Informe No: 11-10-04-A-2
Fecha: 2011-10-10

Referencia: OT: 11-10-04-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Sólidas
Identificación de la muestra: Carbonato de Potasio (03-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 03-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-04-A-2
Fecha de realización de ensayos: 03-10-2011/04-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,9696
Bicarbonato de Sodio	g/g	Método Interno	0,0178

Condiciones Ambientales.- Humedad 44%; Temperatura: 20,6°C

Realizado Por: MFNR

Revisado Por:

Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:

Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iquce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 2 de 2



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-7
Fecha: 2011-10-10

Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 7 (06-10-2011)
Descripción de la muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-7
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,109
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,733

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

Realizado Por: MFNR

Revisado Por:

Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:

Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iquce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 7 de 12



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-8
Fecha: 2011-10-10

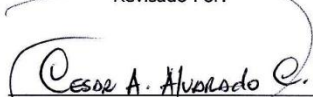
Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 8 (06-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-8
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,117
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,719

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

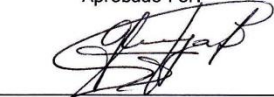
Realizado Por: MFNR

Revisado Por:


Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iquce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 8 de 12



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-9
Fecha: 2011-10-10

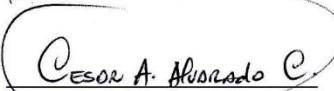
Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 9 (06-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-9
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,114
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,667

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

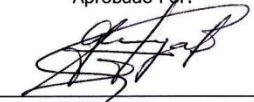
Realizado Por: MFNR

Revisado Por:


Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iquece.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 9 de 12



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-10
Fecha: 2011-10-10

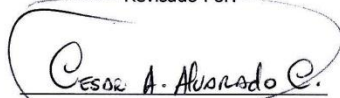
Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 10 (06-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-10
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,120
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,637

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

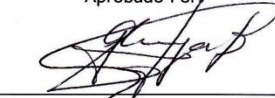
Realizado Por: MFNR

Revisado Por:


Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@ique.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 10 de 12



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-11
Fecha: 2011-10-10

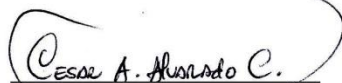
Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 11 (06-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-11
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,118
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,653

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C

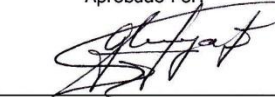
Realizado Por: MFNR

Revisado Por:


Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@quice.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 11 de 12



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
AGUAS

Informe No: 11-10-10-A-12
Fecha: 2011-10-10

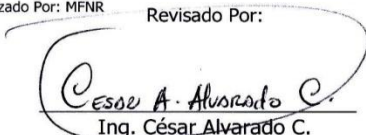
Referencia: OT: 11-10-10-A
Empresa: ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA
Atención: Srta. Andrea Bravo
Dirección: Puembo Barrio La Victoria
Tipo de ensayos: Análisis Físicos Químicos
Tipo de muestra: Carbonato de Sodio y Carbonato de Potasio
Identificación de la muestra: Muestra 12 (06-10-2011)
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Muestra tomada por: Cliente
Fecha de ingreso de muestra: 06-10-2011
Código de la muestra: OE-11-10-10-A-12
Fecha de realización de ensayos: 06-10-2011/07-10-2011

DETERMINACION	UNIDADES	METODO	RESULTADO
Bicarbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,123
Carbonatos	g/g	APHA 2320 B	0,433

Condiciones Ambientales.- Humedad 48%; Temperatura: 19,3°C


Realizado Por: MFNR

Revisado Por:


Ing. César Alvarado C.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:


Ing. Gilberto Moya D., Dpl
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@iquce.edu.ec
QUITO - ECUADOR

MC2201-A01-5

Hoja 12 de 12

ANEXO L

Tabla L.1. HUMEDADES DE EQUILIBRIO PARA ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DEL CARBONATO DE SODIO A 15°C, 25°C, 35°C

Temperatura °C	Aw	Número de repeticiones					Promedio	Desviación estándar s±
		1	2	3	4	5		
15	0,04	0,0199	0,0196	0,0199	0,0197	0,0195	0,0197	0,0002
	0,1	0,0608	0,0648	0,0699	0,0627	0,0596	0,0635	0,0040
	0,44	1,3445	1,1831	1,1495	1,2531	1,3321	1,2525	0,0869
	0,7	6,9534	6,9619	6,6738	6,9231	6,9253	6,8875	0,1207
	0,75	8,6703	8,9890	8,8054	8,8544	8,8117	8,8262	0,1143
	0,85	14,1803	13,3129	13,1752	13,6671	13,2196	13,5110	0,4211
	0,89	16,7870	16,4837	16,9371	14,0820	16,6850	16,1950	1,1926
25	0,04	0,0305	0,0339	0,0292	0,0299	0,0300	0,0307	0,0018
	0,1	0,1089	0,0941	0,0971	0,1098	0,1049	0,1030	0,0070
	0,44	2,1521	2,3659	2,2999	2,2520	2,3623	2,2864	0,0887
	0,7	11,4582	11,4346	11,3922	11,2359	11,3507	11,3743	0,0876
	0,75	13,7318	13,2399	13,4757	13,4457	13,1230	13,4033	0,2346
	0,85	20,8087	20,4652	21,6876	16,9094	19,3651	19,9677	1,8459
	0,89	19,5505	22,6825	21,8621	22,4604	21,1728	21,5457	1,2598
35	0,04	0,1371	0,1344	0,1345	0,1391	0,1385	0,1367	0,0022
	0,1	0,5214	0,4791	0,4578	0,5062	0,5249	0,4979	0,0288
	0,44	3,4010	3,5417	3,5889	4,0113	3,5090	3,6104	0,2346
	0,7	14,0473	14,0957	13,9483	14,0266	14,2379	14,0712	0,1073
	0,75	18,2879	18,0751	17,9826	17,9554	17,9195	18,0441	0,1479
	0,85	23,1179	23,5110	23,9735	23,4681	25,3724	23,8886	0,8835
	0,89	26,5075	25,6286	27,5128	27,0666	26,8060	26,7043	0,7056

ANEXO M

Tabla M.1. HUMEDADES DE EQUILIBRIO PARA ISOTERMAS DE SORCIÓN DEL CARBONATO DE POTASIO A 15°C, 25°C, 35°C

Temperatura °C	aw	Número de repeticiones					Promedio	Desviación estándar s±
		1	2	3	4	5		
15	0,04	0,7280	0,7419	0,7557	0,6974	0,7505	0,7347	0,0233
	0,1	1,7208	1,7283	1,7713	1,9351	1,0904	1,6492	0,3241
	0,44	8,0870	8,1105	8,1182	8,2256	8,1419	8,1366	0,0535
	0,7	17,6667	17,4947	17,3248	17,7783	17,4829	17,5495	0,1761
	0,75	21,0162	21,2684	19,7154	21,8090	21,2854	21,0189	0,7837
	0,85	26,7960	27,1961	26,5631	26,2363	27,4116	26,8406	0,4735
	0,89	31,4058	30,3249	31,1121	26,5566	31,0826	30,0964	2,0187
25	0,04	1,2433	1,1643	1,2117	1,1971	1,2367	1,2106	0,0319
	0,1	2,1138	2,1199	2,0893	2,1424	2,0803	2,1091	0,0248
	0,44	14,5459	14,5380	14,0779	13,8693	14,4349	14,2932	0,3041
	0,7	36,0322	36,2890	36,7082	36,5387	36,1864	36,3509	0,2718
	0,75	42,5537	43,3625	42,1644	40,3415	41,9736	42,0791	1,1079
	0,85	55,9653	57,6644	56,8437	55,2062	56,0160	56,3391	0,9406
	0,89	73,8210	73,7512	75,5982	71,8947	73,3861	73,6903	1,3208
35	0,04	1,2415	1,2833	1,2293	1,2351	1,2757	1,2530	0,0247
	0,1	2,6074	3,3813	3,5674	3,5890	2,7740	3,1838	0,4611
	0,44	19,9891	20,0793	20,6859	20,3535	19,6029	20,1421	0,4058
	0,7	46,6591	46,6475	46,6464	46,6554	46,6600	46,6537	0,0064
	0,75	53,8843	53,8549	53,8363	53,9892	53,8496	53,8829	0,0620
	0,85	68,3582	68,3735	68,5763	68,8373	68,5199	68,5330	0,1941
	0,89	75,5345	74,5971	74,4081	76,9128	76,4107	75,5727	1,0963

ANEXO N

Tabla N.1. HUMEDADES DE EQUILIBRIO DE CARBONATO DE POTASIO Y CARBONATO DE SODIO CALCULADAS POR EL MODELO DE BET

Temperatura (°C)	aw	ADSORCIÓN	
		<i>Humedad de equilibrio (%b.s.)</i>	
		Carbonato de potasio	Carbonato de sodio
15	0,04	0,7347	0,0417
	0,1	1,5500	0,1111
	0,44	5,0194	0,7857
	0,7	10,5381	2,3333
	0,75	12,9812	3,0453
	0,85	21,8916	5,6667
	0,89	30,0964	8,0909
25	0,04	0,8530	0,0461
	0,1	2,1091	0,1229
	0,44	10,5613	0,8694
	0,7	25,6407	2,5818
	0,75	31,8490	3,3696
	0,85	56,3391	6,2700
	0,89	78,4489	8,9524
35	0,04	1,4164	0,1876
	0,1	3,1838	0,4979
	0,44	11,9127	3,4230
	0,7	26,0110	9,9543
	0,75	31,8225	12,9371
	0,85	54,7994	23,8886
	0,89	75,5727	34,0009

ANEXO P

Tabla P.1. HUMEDADES DE EQUILIBRIO DE CARBONATO DE POTASIO Y CARBONATO DE SODIO CALCULADAS POR EL MODELO DE GAB

Temperatura (°C)	aw	ADSORCIÓN	
		<i>Humedad de equilibrio (%b.s.)</i>	
		Carbonato de potasio	Carbonato de sodio
15	0,04	0,6481	0,0442
	0,1	1,6492	0,1183
	0,44	8,6132	0,8712
	0,7	17,5495	2,8567
	0,75	20,2358	3,9160
	0,85	26,6516	8,9440
	0,89	30,0964	16,1714
25	0,04	0,8014	0,0468
	0,1	2,1091	0,1253
	0,44	13,2386	0,9315
	0,7	31,2566	3,1347
	0,75	36,9268	4,3582
	0,85	52,6612	10,6753
	0,89	61,4934	21,5457
35	0,04	1,2530	0,1873
	0,1	3,1838	0,4979
	0,44	16,9966	3,4173
	0,7	37,4732	9,5083
	0,75	44,1245	12,0597
	0,85	63,6948	20,3299
	0,89	75,5727	26,7043

ANEXO Q

Tabla Q.1. HUMEDADES DE EQUILIBRIO DE CARBONATO DE POTASIO Y CARBONATO DE SODIO CALCULADAS POR EL MODELO DE D'ARCY AND WATT

Temperatura (°C)	aw	ADSORCIÓN	
		<i>Humedad de equilibrio (%b.s.)</i>	
		Carbonato de potasio	Carbonato de sodio
15	0,04	0,6502	0,0197
	0,1	1,6492	0,0635
	0,44	8,5177	1,2525
	0,7	17,5495	5,8011
	0,75	20,2929	7,7366
	0,85	26,7432	13,0583
	0,89	30,0964	16,1950
25	0,04	0,8207	0,0300
	0,1	2,1091	0,1030
	0,44	14,2932	2,2864
	0,7	35,8446	9,3111
	0,75	41,9043	11,8895
	0,85	56,3391	18,2118
	0,89	63,0614	21,5457
35	0,04	1,2530	0,1367
	0,1	3,1838	0,3339
	0,44	18,8591	3,6104
	0,7	41,9125	12,9585
	0,75	48,6655	16,0781
	0,85	66,3106	23,1995
	0,89	75,5727	26,7043

ANEXO R

AJUSTE DE CURVAS DE SORCIÓN DE HUMEDAD PARA EL CARBONATO DE SODIO CON CUATRO MODELOS MATEMÁTICOS A 15, 25 y 35°C

Ajuste de curvas de sorción de humedad para el carbonato de sodio a 15°C

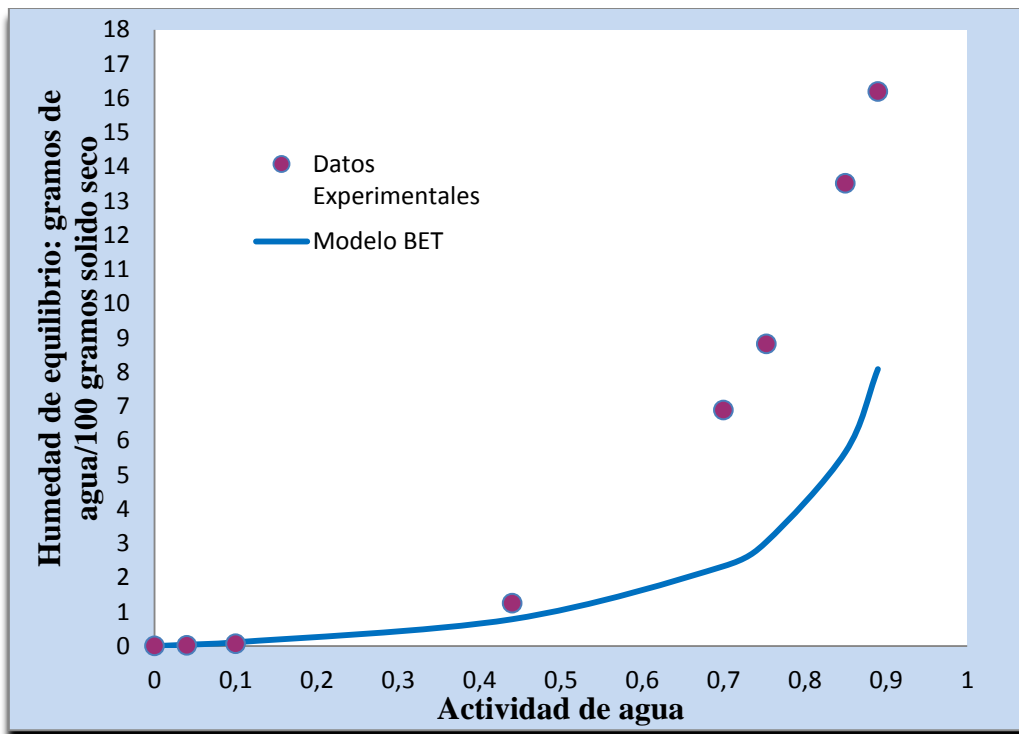


Gráfico R.1. Modelo de BET

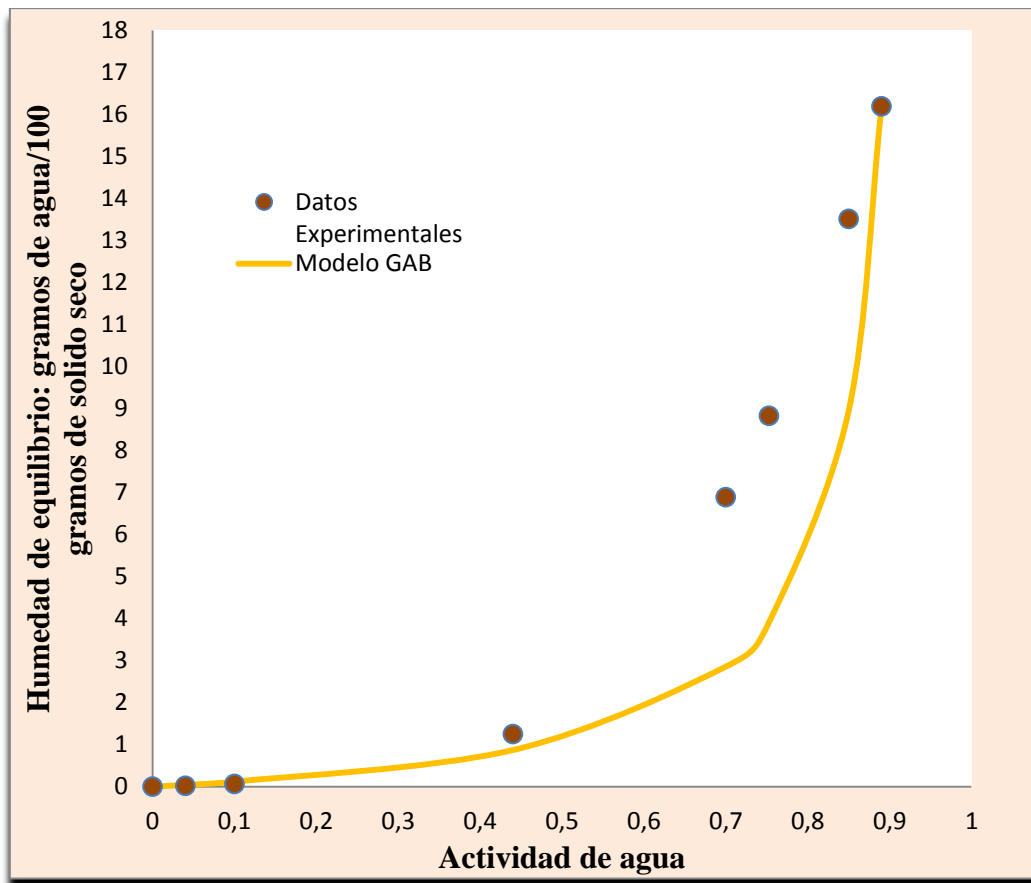


Gráfico R.2. Modelo de GAB

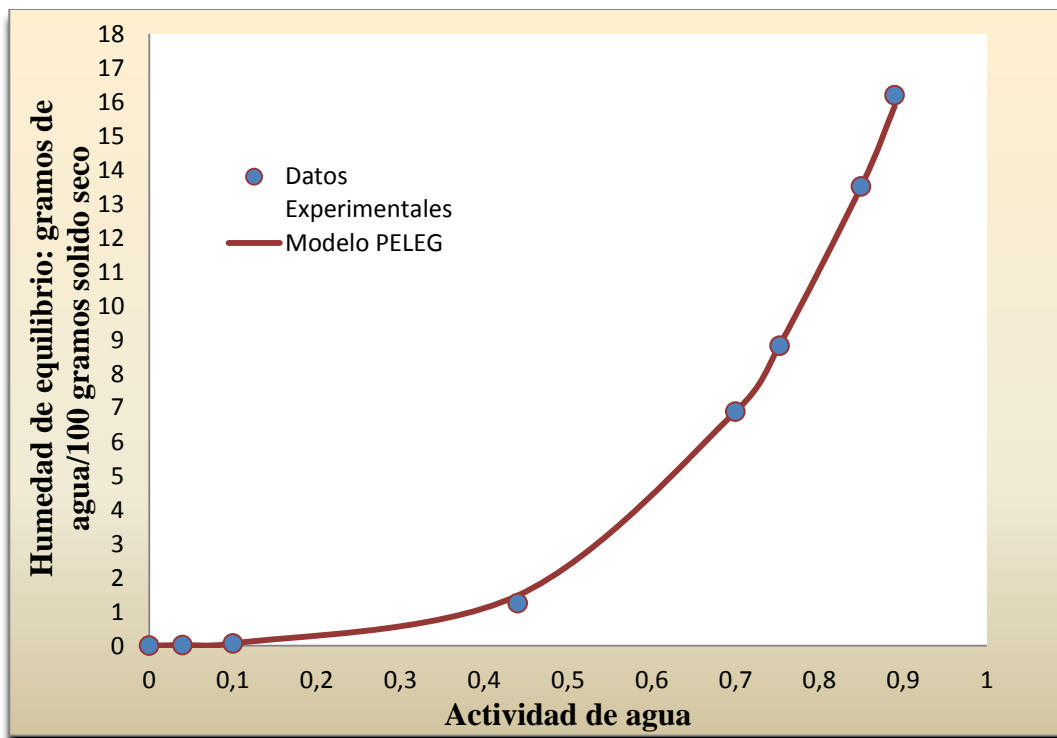


Gráfico R.3. Modelo de PELEG

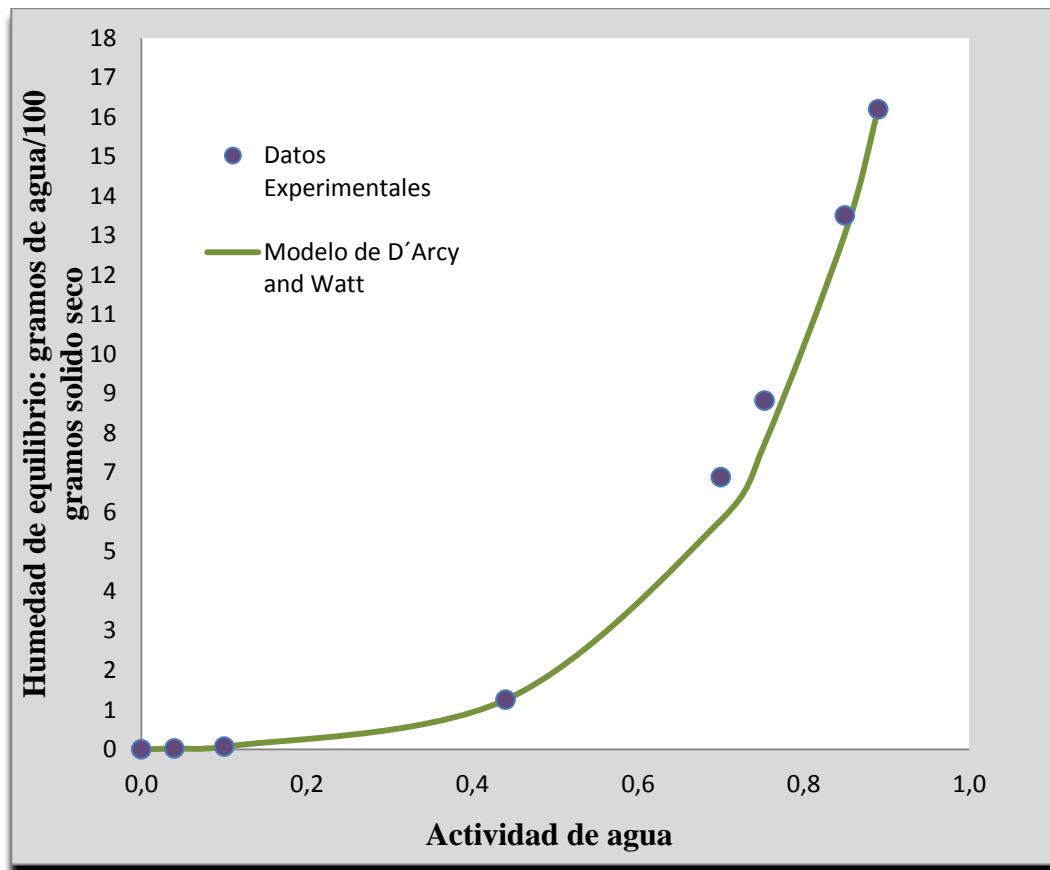


Gráfico R.4. Modelo de D'Arcy and Watt

Ajuste de curvas de sorción de humedad para el carbonato de sodio a 25°C

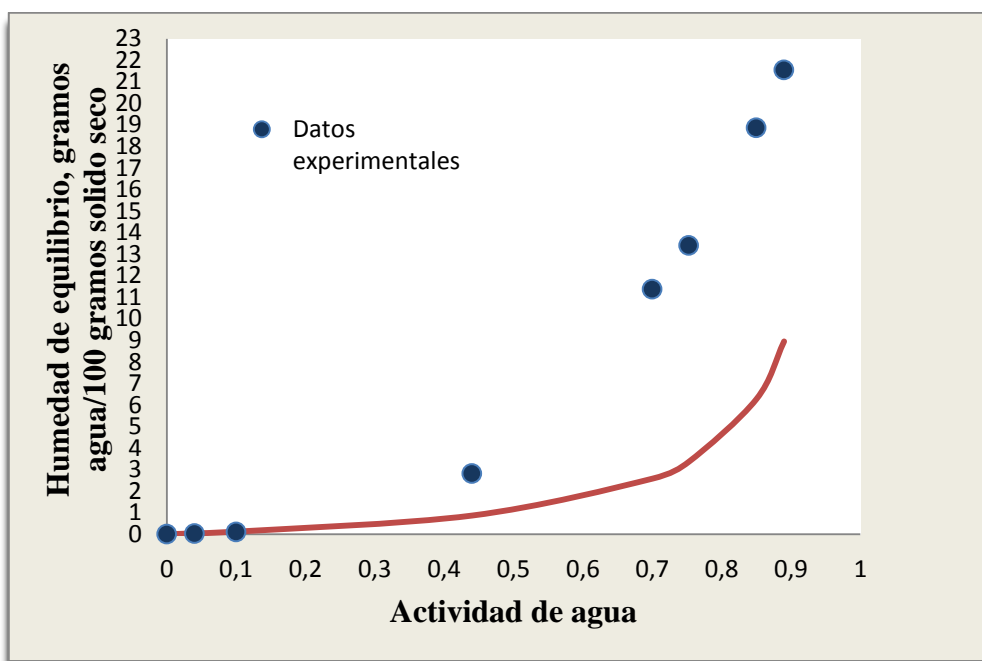


Gráfico R.5. Modelo de BET

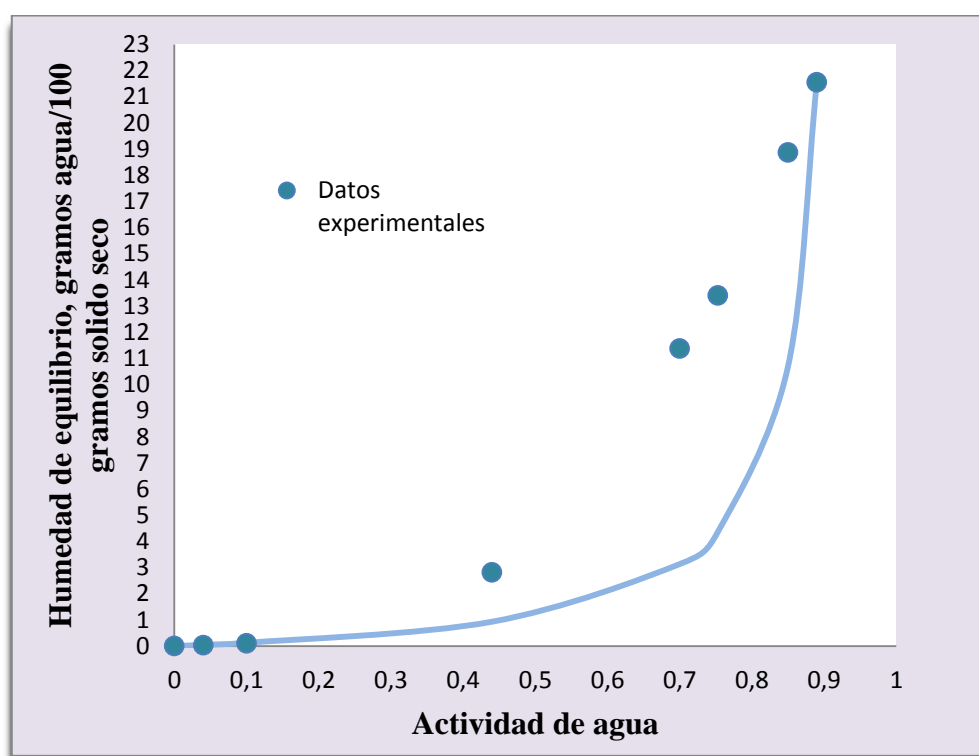


Gráfico R.6. Modelo de GAB

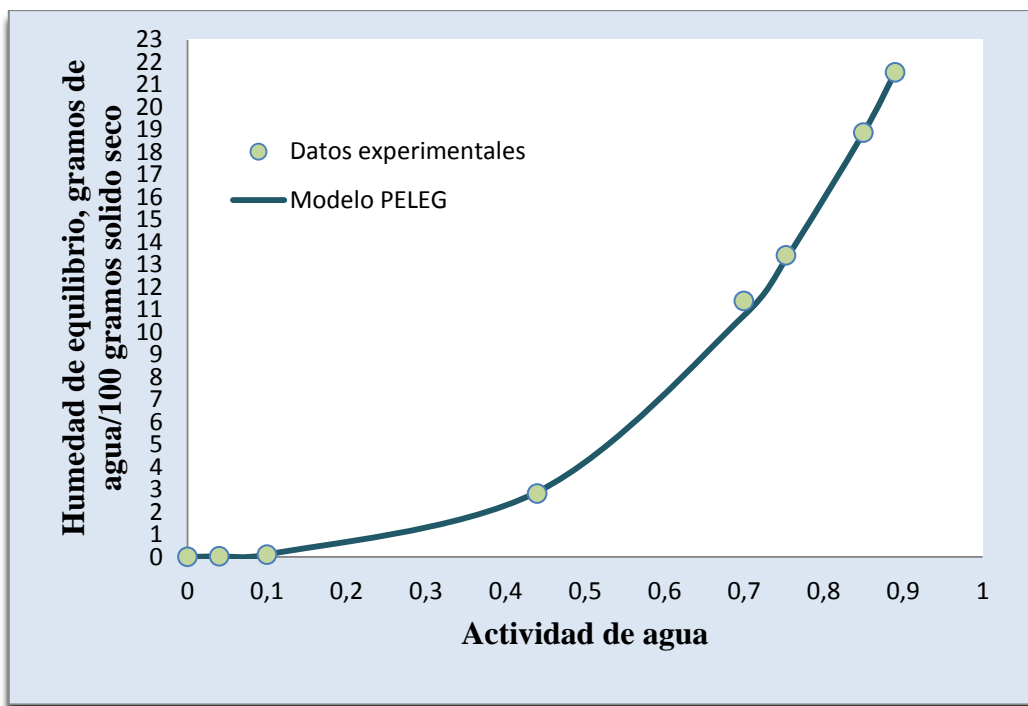


Gráfico R.7. Modelo de PELEG

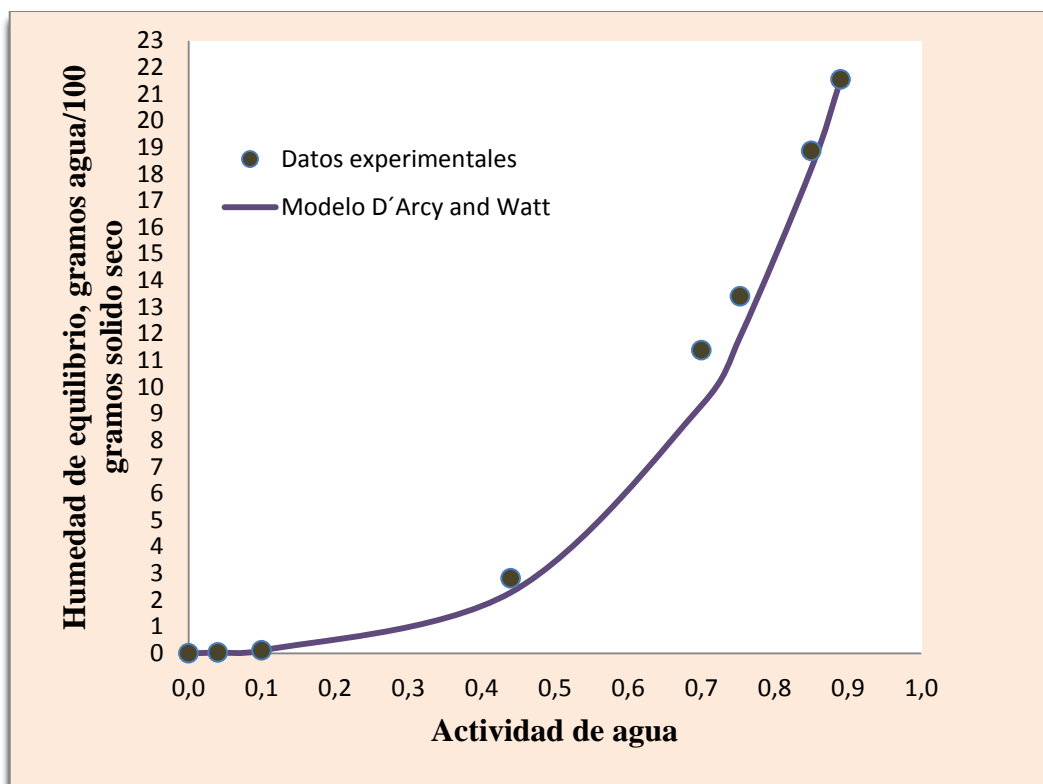


Gráfico R.8. Modelo de D'Arcy and Watt

Ajuste de curvas de sorción de humedad para el carbonato de sodio a 35°C

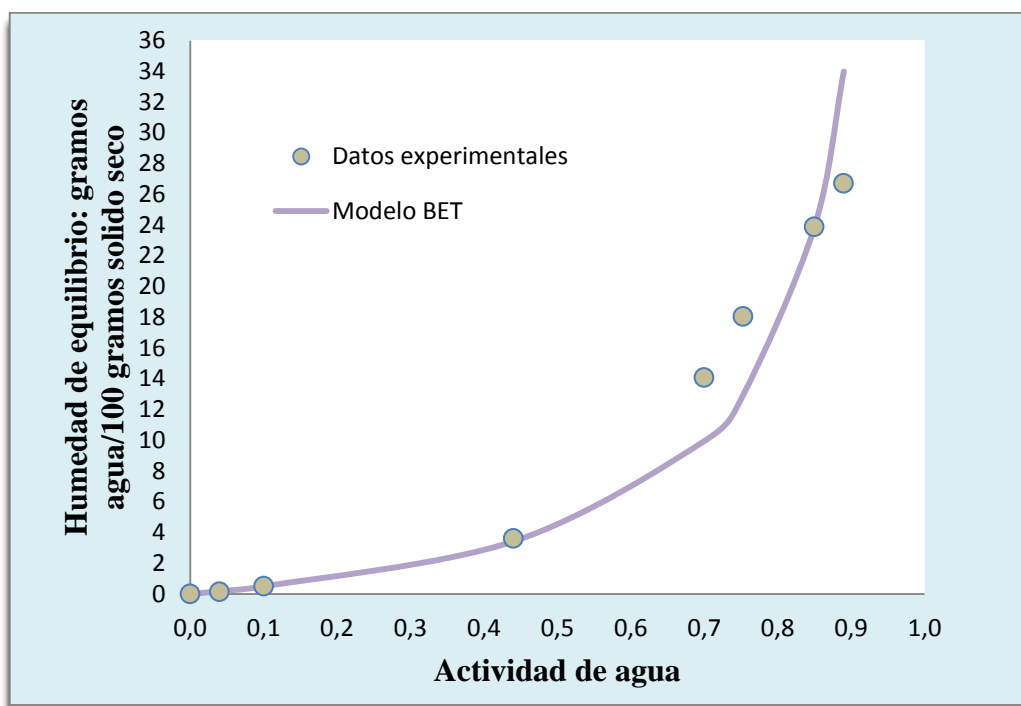


Gráfico R.9. Modelo de BET

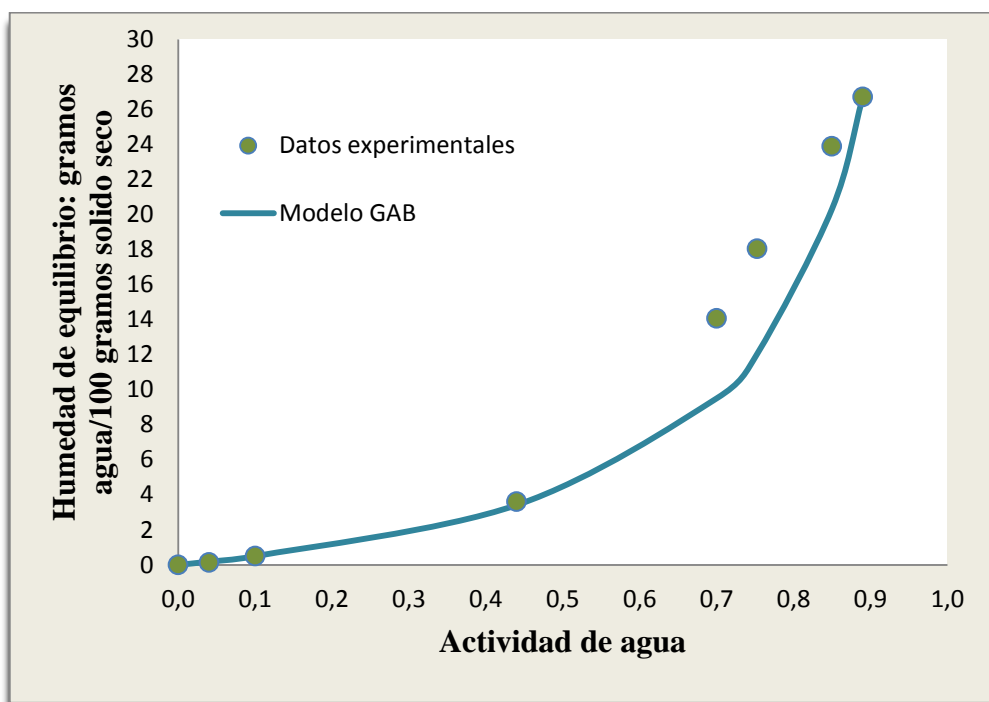


Gráfico R.10. Modelo de GAB

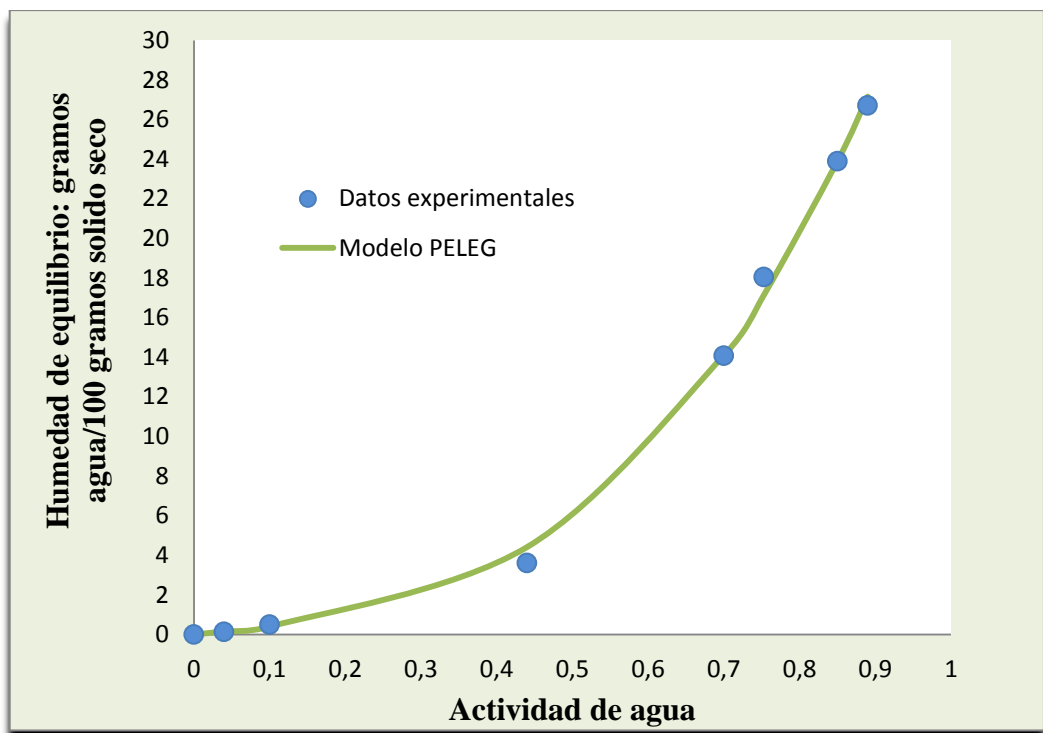


Gráfico R.11. Modelo de PELEG

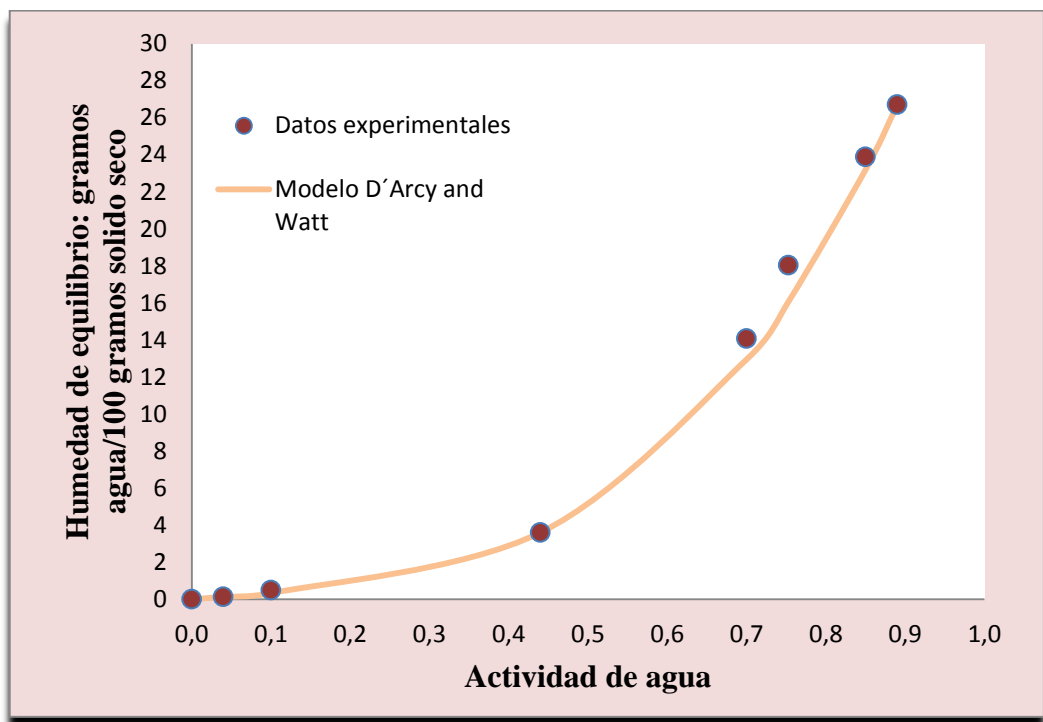


Gráfico R.12. Modelo de D'Arcy and Watt

ANEXO S

AJUSTE DE CURVAS DE SORCIÓN DE HUMEDAD PARA EL CARBONATO DE POTASIO CON CUATRO MODELOS MATEMÁTICOS A 15, 25 y 35°C

Ajuste de curvas de sorción de humedad para el carbonato de potasio a 15°C

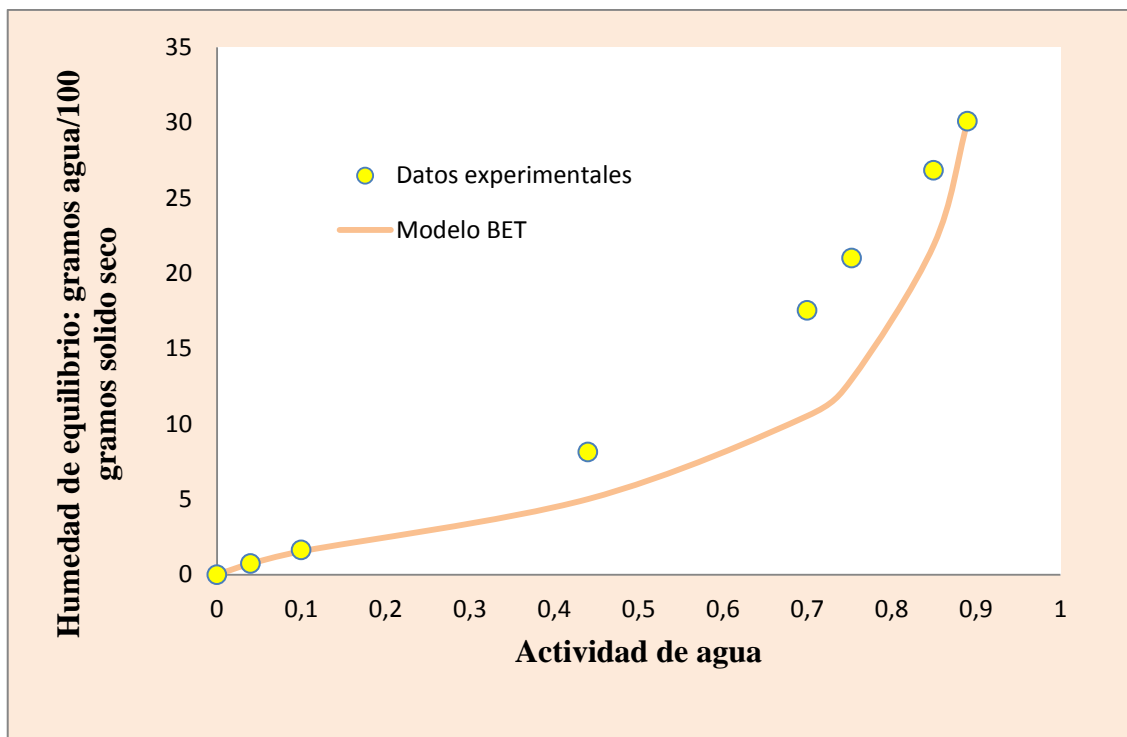


Gráfico S.1. Modelo de BET

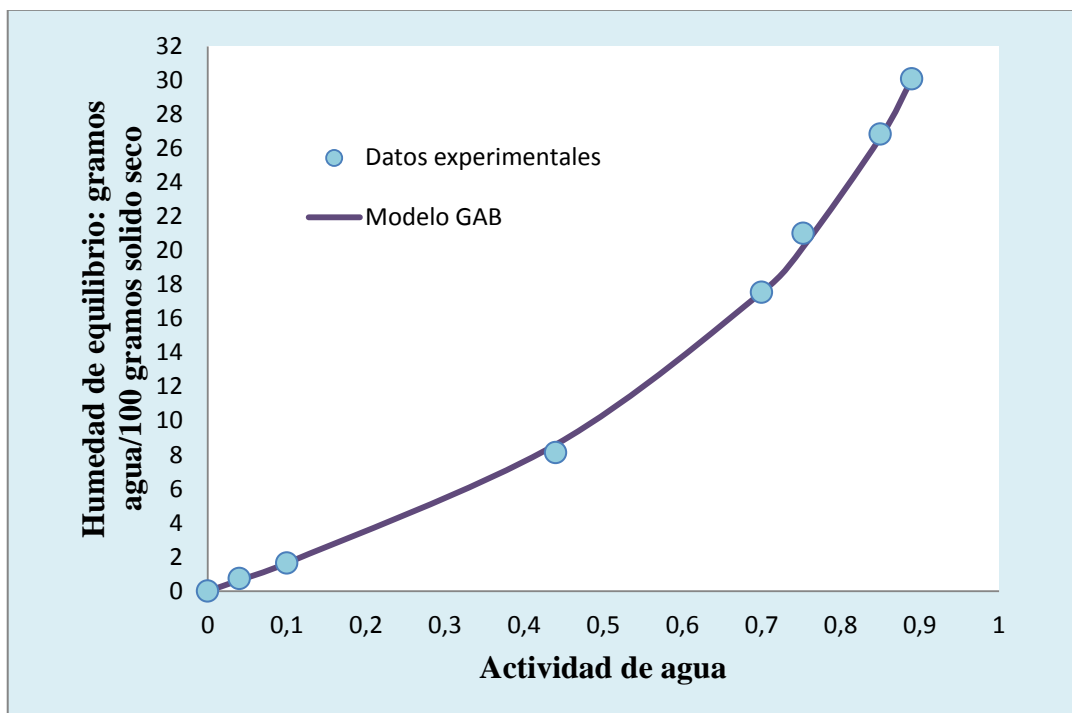


Gráfico S.2. Modelo de GAB

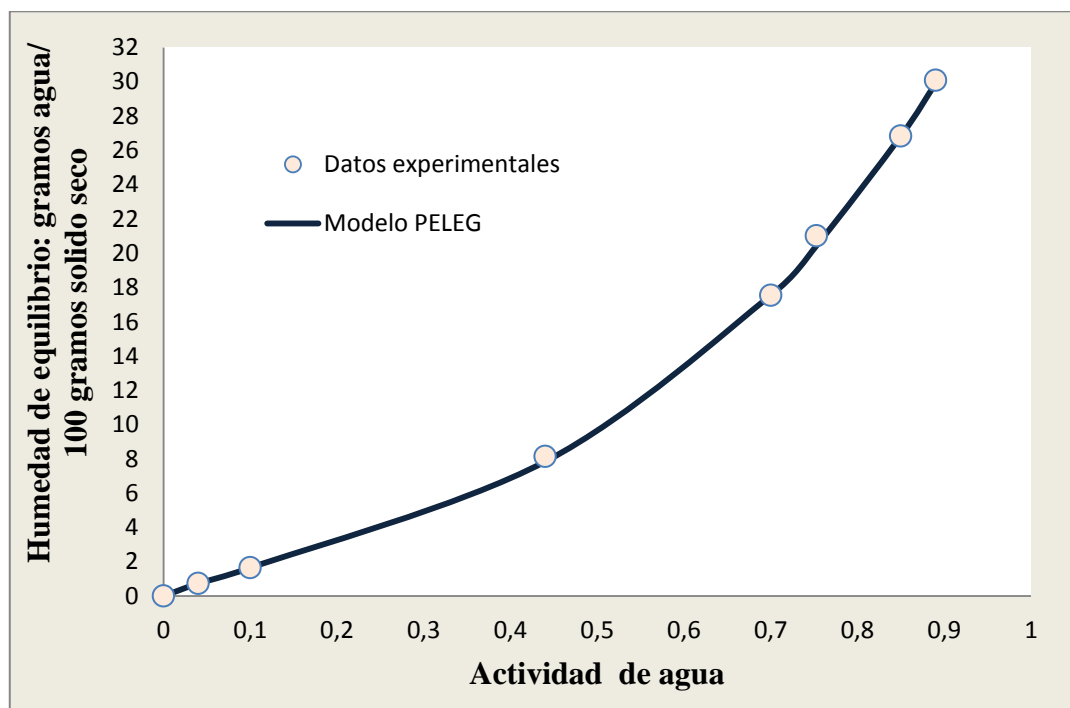


Gráfico S.3. Modelo de PELEG

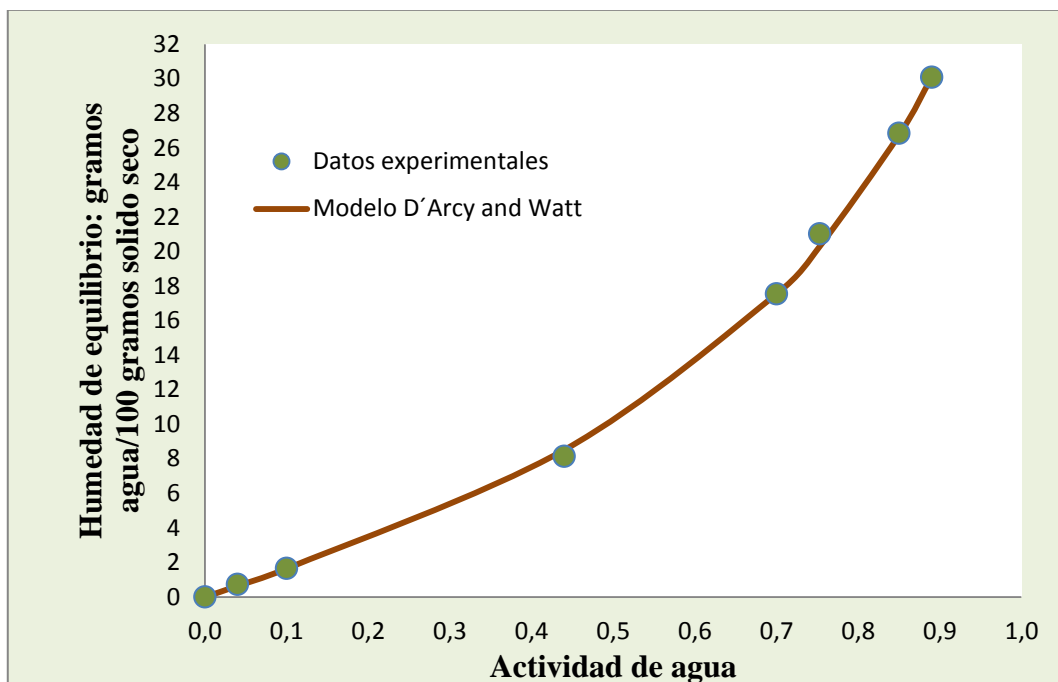


Gráfico S.4. Modelo de D'Arcy and Watt

Ajuste de curvas de sorción de humedad para el carbonato de potasio a 25°C

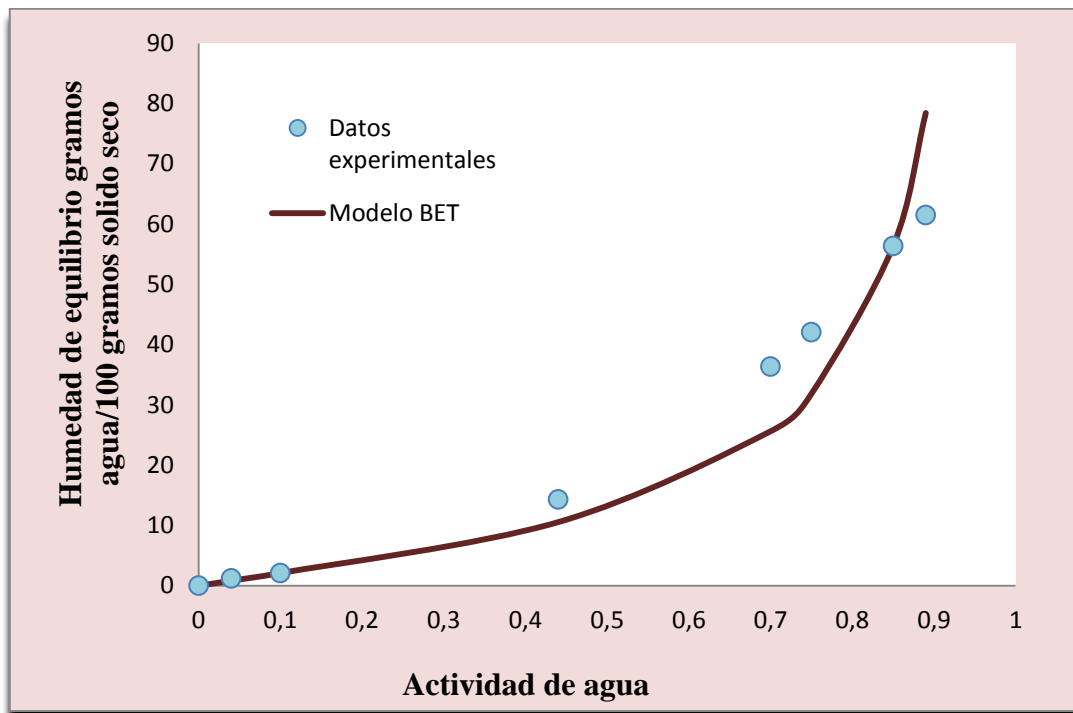


Gráfico S.5. Modelo de BET

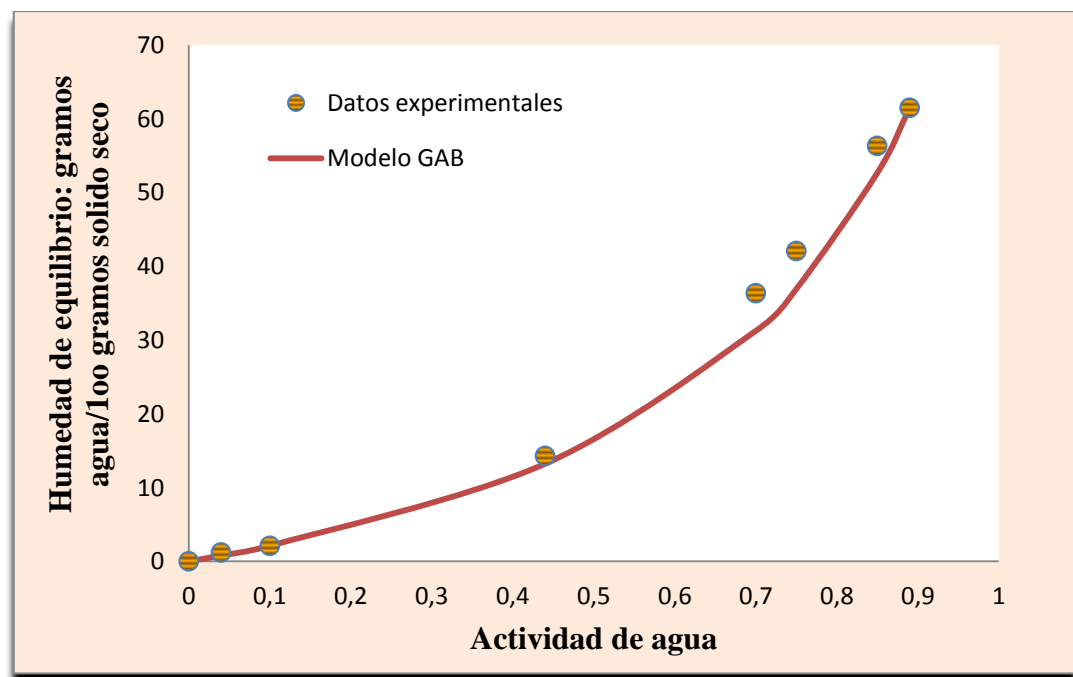


Gráfico S.6. Modelo de GAB

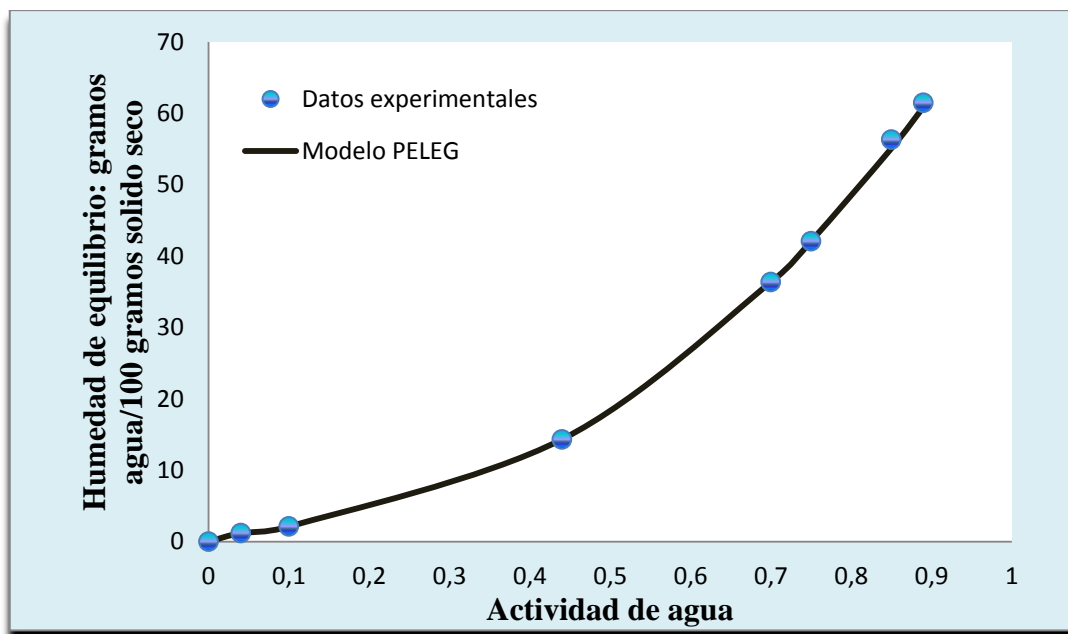


Gráfico S.7. Modelo de PELEG

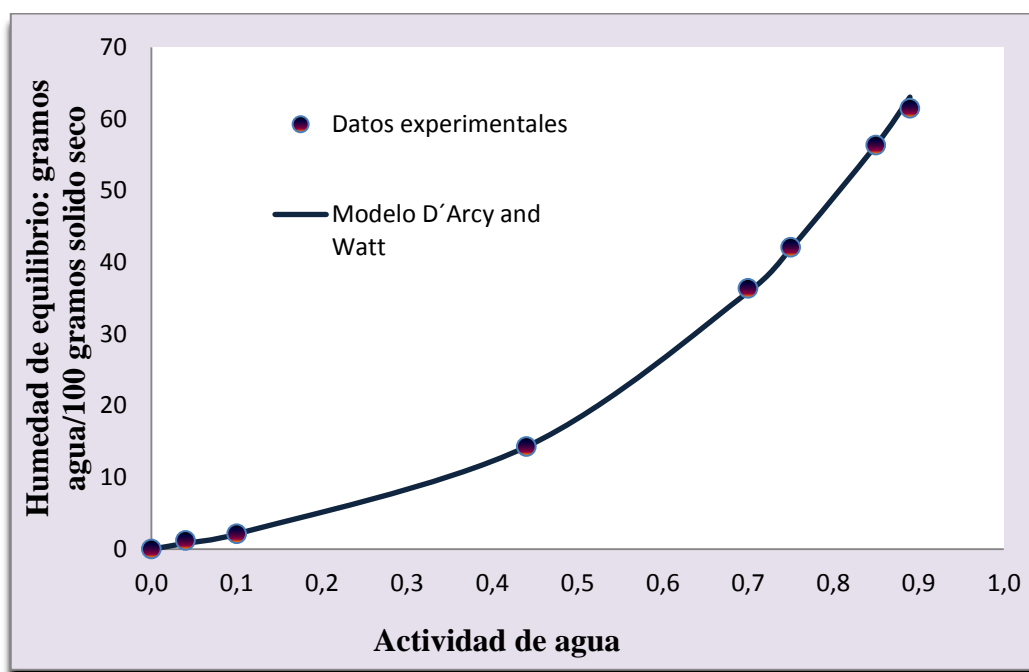


Gráfico S.8. Modelo de D'Arcy and Watt

Ajuste de curvas de sorción de humedad para el carbonato de potasio a 35°C

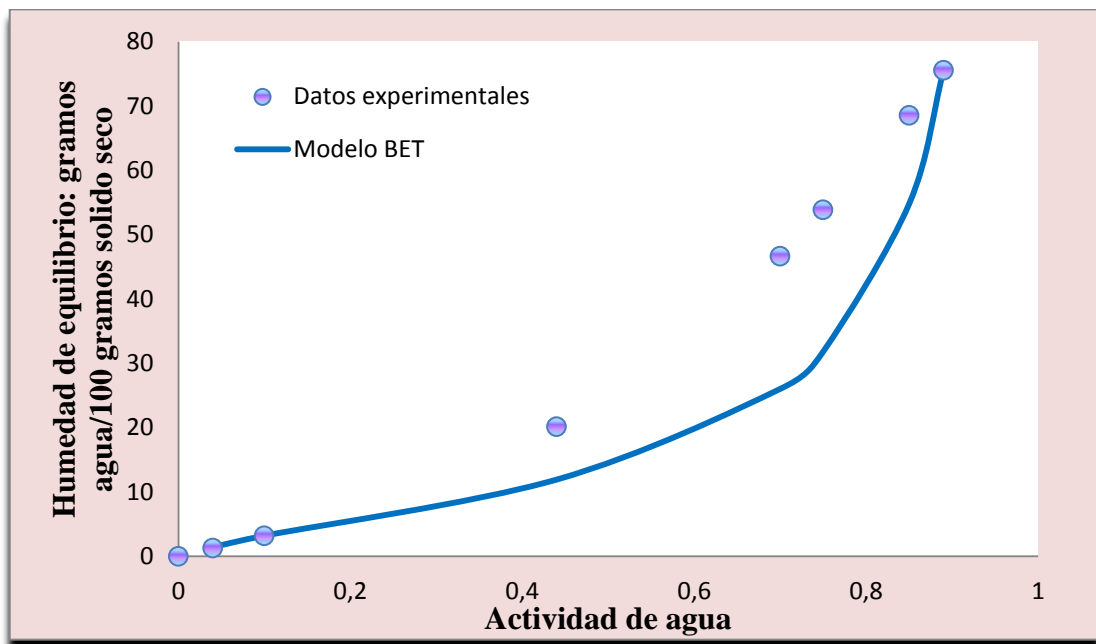


Gráfico S.9. Modelo de BET

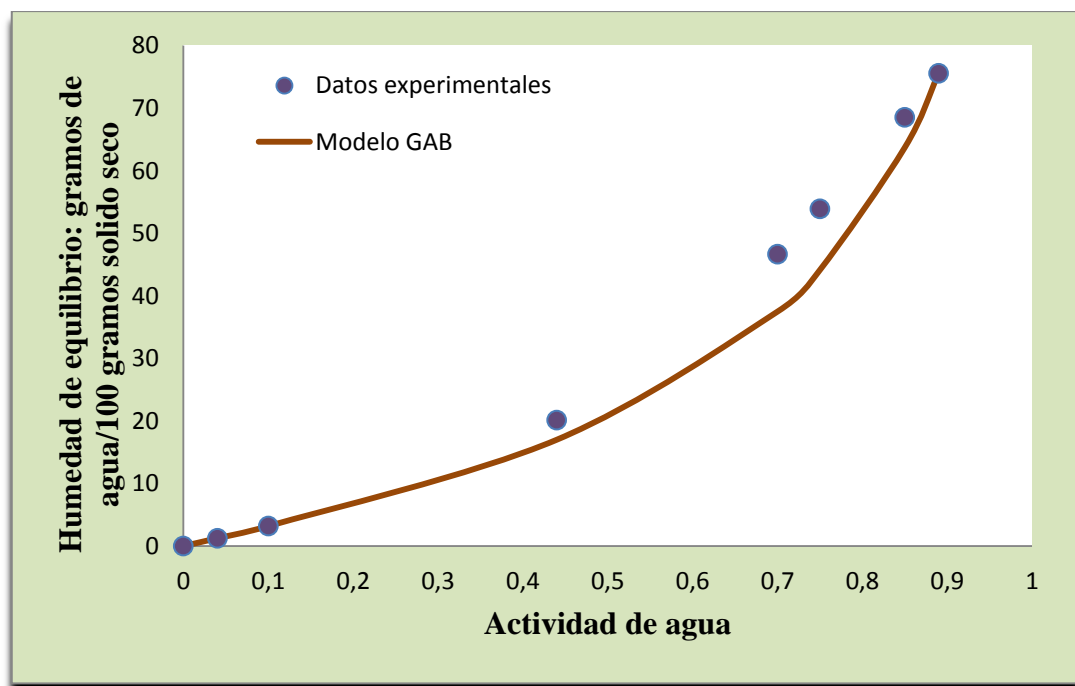


Gráfico S.10. Modelo de GAB

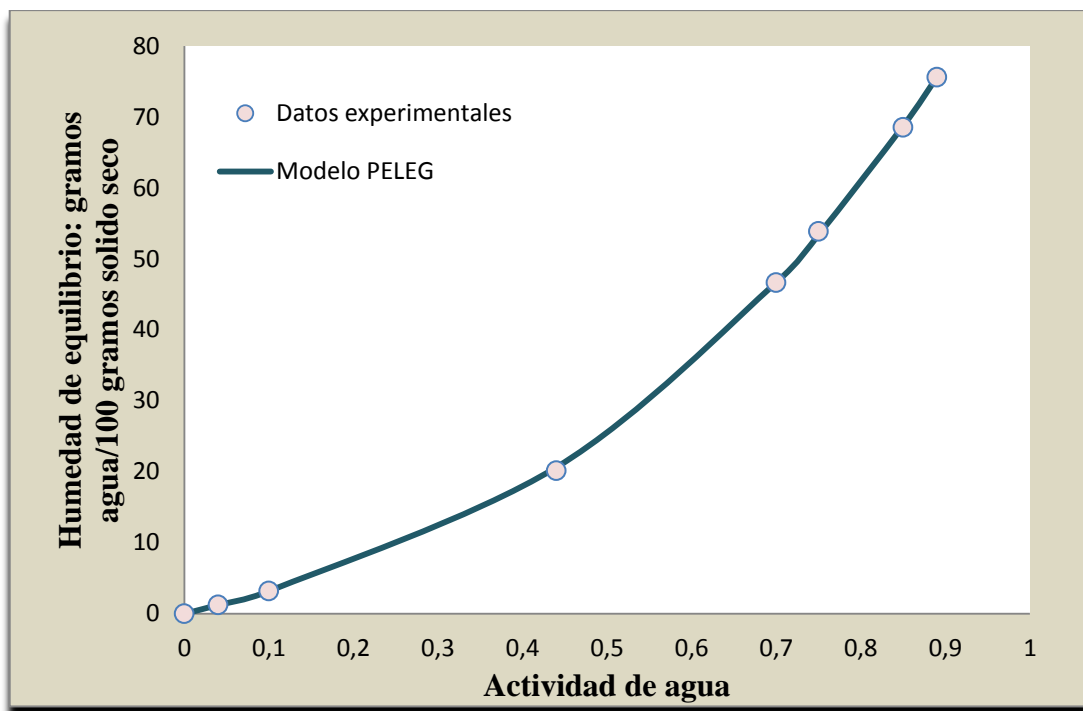


Gráfico S.11. Modelo de PELEG

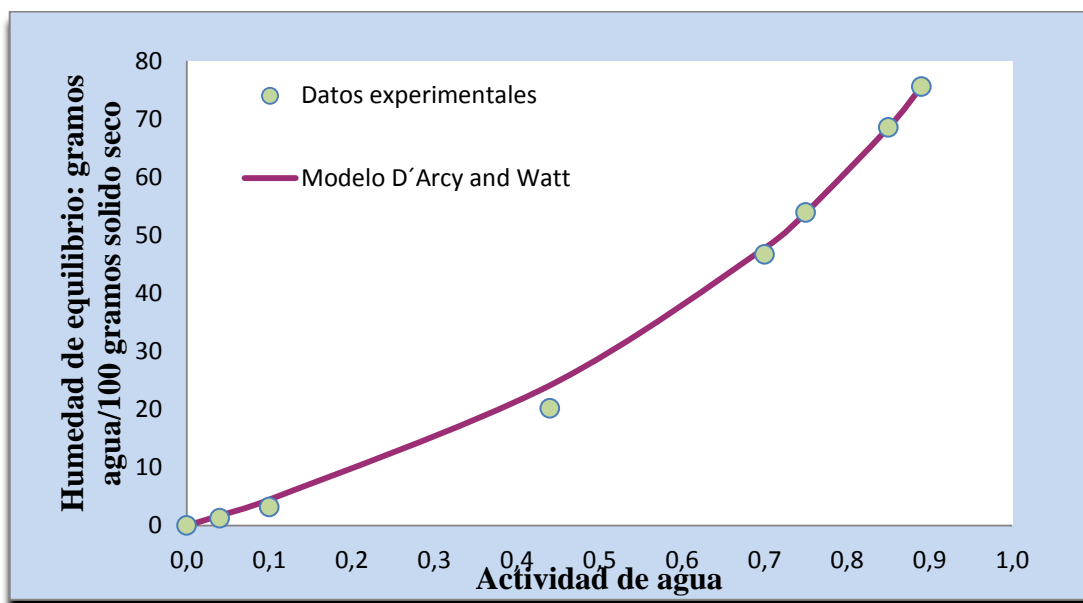


Gráfico S.12. Modelo de D'Arcy and Wat